

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff

**Verbesserung der vorklinischen Ausbildung  
durch computerunterstützte Auswertung der Zahnaufstellung  
in Teilprothesen**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von  
Nathalie Proske  
aus Passau  
2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Florian Beuer MME

Mitberichterstatter: PD Dr. Jan Kiesewetter

Mitbetreuung durch die  
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. dent. Ephraim Nold M. Sc.  
Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Ing. Kurt-Jürgen Erdelt

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2022

Hinweis: Die im nachfolgenden Text genannten Gebrauchsnamen, Handelsnamen und Warenbezeichnungen sind teilweise patent- und urheberrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises bzw. des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, dass kein Schutz besteht.

Meiner Familie gewidmet

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
2.	Literaturübersicht .....	2
2.1	Lehrforschung.....	2
2.1.1	Entwicklung der Lehrforschung.....	2
2.1.2	Multimediales Lernen.....	3
2.1.3	Zahnmedizinische Lehre .....	4
2.2	Okklusionsprinzip und Ideale Zahnaufstellung einer Teilprothese.....	7
2.2.1	Natürliche Verzahnung .....	7
2.2.2	Ersatzmöglichkeiten mit Teilprothesen .....	8
2.2.3	Lernziele für Studenten bei der Teilprothese .....	13
2.3	Bisherige Bewertungskriterien/Feedbackmöglichkeiten im vorklinischen Studentenkurs.....	17
2.3.1	Feedback durch wissenschaftliche Mitarbeiter.....	17
2.3.2	Feedback durch Hilfsmittel.....	18
2.3.3	Feedback durch Mitstudenten.....	20
2.3.4	Feedback durch Zahntechniker.....	20
2.3.5	Bereits vorhandene digitale Hilfsmöglichkeiten (in Vorlesung etc.) .....	21
3.	Zielsetzung.....	22
4.	Material und Methode .....	23
4.1	Übersicht .....	23
4.2	Herstellung der Teilprothese.....	24
4.2.1	Herstellung der Doublrierform .....	24
4.2.2	Herstellung der Gipsmodelle.....	24
4.2.3	Biegen der E-Draht-Klammern.....	24
4.2.4	Einartikulieren und Kieferrelationsbestimmung.....	25
4.2.5	Zahnaufstellung .....	25
4.2.6	Erster Scan .....	26
4.2.7	Injizieren .....	33
4.2.8	Ausarbeitung und Politur.....	34
4.2.9	Zweiter Scan.....	34
4.2.10	Fertigungsschritte der Teilprothese.....	35
4.2.11	Auswertung der Abweichungen .....	38
4.2.12	Traditionelle Auswertung .....	40

---

4.2.13	Digitale Auswertung .....	40
4.2.14	Statistische Datenauswertung.....	40
5.	Ergebnisse .....	42
6.	Diskussion.....	45
6.1	Studienaufbau.....	45
6.2	Diskussion von Material und Methode .....	46
6.2.1	Computerunterstützte Lehre .....	46
6.2.2	Alternative Darstellung des digitalen Scan.....	51
6.2.2	Herstellung der Teilprothese .....	52
6.2.3	Scanvorgang .....	54
6.2.4	Matching .....	54
6.2.5	Injizieren .....	55
6.3	Diskussion der Ergebnisse .....	55
6.4	Ausblick .....	59
6.5	Schlussfolgerungen .....	62
7.	Zusammenfassung .....	63
8.	Literaturverzeichnis.....	65
9.	Anhang.....	71
9.1	Messwerte .....	71
9.2	Materialliste .....	85
9.3	Geräteliste .....	91
9.4	Abbildungsverzeichnis .....	95
9.5	Tabellenverzeichnis .....	96
9.6	Abkürzungsverzeichnis.....	96
10.	Danksagungen.....	97
11.	Eidesstattliche Versicherung.....	98

### 1. EINLEITUNG

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die Bedeutung digitaler Technologien in der Zahnmedizin enorm zugenommen. Neue Scan-, Design- und Herstellungsverfahren, die viele Prozesse verändert und vor allem auch wesentlich vereinfacht haben, wurden von der Dentalindustrie auf den Markt gebracht [1]. Digitale Technologien bieten nicht nur in der Praxis bzw. im Klinikalltag und in der Forschung, sondern auch in der zahnmedizinischen Lehre ein großes Potenzial. Im Studium der Zahnmedizin können diese bildgebenden digitalen Technologien den Studierenden durch die optische Darstellung und Auswertung [2] helfen, die Arbeitsanweisungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter besser umzusetzen. Comenius wies bereits im 17. Jahrhundert darauf hin, dass Bilder aufgrund ihrer Anschaulichkeit für den Wissenserwerb sehr wichtig sind [2]. Für Anfänger von großem Wert ist das sogenannte *Discrimination Training* [3], bei dem sie ihr Urteilsvermögen durch Vergleiche idealer Objekte mit weniger guten schärfen können. Jede Lerneinheit sollte damit beginnen, dass die Anfänger genau erkennen, wie das ideale Endprodukt auszusehen hat [3, 4]. Sie brauchen zudem klare Arbeitsanweisungen und standardisierte oder ideale Gegebenheiten, um sich fundierte Kenntnisse für die spätere Arbeit anzueignen [5]. Zudem können digitale Technologien den Lehrenden helfen, die Arbeiten ihrer Studierenden zu analysieren und diese objektiv zu bewerten. Ein weiterer Grund dafür, digitale Technologien in der vorklinischen Lehre einzuführen, liegt in der Möglichkeit des sogenannten *Dual Coding*. Die Theorie des *Dual Coding* besagt, dass sowohl die visuelle als auch die verbale Information in Kombination miteinander entscheidend ist, um sich Informationen gut merken zu können. Die Möglichkeit, das Gehirn auf zwei unterschiedlichen Wegen zu stimulieren, erhöht die Chance, die Informationen im Langzeitgedächtnis abzuspeichern [6]. Dies stellt ein großes Potential in der zahnmedizinischen Lehre im Bereich Zahnaufstellung dar, denn die Stellung der Zähne begleitet eine(n) Zahnarzt/Zahnärztin ein Leben lang. Die Lernenden erzielen durch die Kombination von Wörtern und Bildern einen deutlich besseren Lerneffekt [7]. Das Zusammenspiel von Scannern, der 3-D-Analyse und dem Vergleich mit der idealisierten Referenz kann in der heutigen zahnmedizinischen Lehre ein sehr großes Potential in der Umsetzung von Arbeitsanweisungen ergeben. Das Ziel dieser Studie war es, den Einfluss digitalen Feedbacks bei der Zahnaufstellung einer Teilprothese in der vorklinischen Ausbildung auf deren Qualität zu untersuchen.

## **2. LITERATURÜBERSICHT**

### **2.1 LEHRFORSCHUNG**

#### **2.1.1 ENTWICKLUNG DER LEHRFORSCHUNG**

Am Anfang der Lehrforschung stand Johann Amos Comenius (16. Jahrhundert).

Comenius' Leitgedanke war „Omnes omnia omnino“. Dies bedeutet, frei übersetzt, „alle alles ganz zu lehren“. Comenius' Lebenswerk übte einen Einfluss auf die Durchsetzung der allgemeinen Schulpflicht und auf die Einführung des muttersprachlichen Unterrichts als Fundament der Volksbildung aus [8].

Sein Prinzip war die Anschaulichkeit. Alles solle anschaulich und lesbar gestaltet sein; das Lehrmaterial solle den Sinnen vorgeführt werden, damit es von den Lernenden leicht aufgenommen werden könne, und es solle natürlich gelehrt werden, vom Einfachen zum Schwierigen, vom Allgemeinen zum Besonderen, vom Generellen zum Speziellen und vom Bekannten zum Neuen [9]. Comenius verband mit seiner Veröffentlichung von 1658 als Erster lehrhafte Texte mit Abbildungen [10]. Diese Lehre führte zum Übergang vom bis dahin in den Schulen hauptsächlich gelehrt Verbalismus zum Sensualismus [11].

Im 17. und 18. Jahrhundert wurde die Lehrforschung von Jean-Jaques Rousseau weiterentwickelt [12]. Bekannt wurde dieser durch sein Werk „Emile oder über die Erziehung“ („Émile ou de l'éducation“), in dem er die freie Entfaltung von Kindern forderte [13]. Er stellte Erziehungstheorien auf, die bis in die Gegenwart nachwirken [13, 14].

Eine der letzten wesentlichen Lehrentwicklungen in der Vergangenheit wurde im 19. Jahrhundert von Maria Montessori eingeleitet [15]. Ihr Bildungskonzept umfasste die Zeit vom Kleinkind bis zum jungen Erwachsenen. Sie verwendete in ihren Schulen die Techniken des „offenen Unterrichts“ und der „Freiarbeit“. Das Ziel dieser Techniken ist es, dass die Lehrenden die Kinder beobachten und dadurch die optimale Technik finden, um deren Lernprozesse zu fördern. Der Grundgedanke der Montessori-Pädagogik lautet: „Hilf mir, es selbst zu tun.“ [16, 17]

## 2.1.2 MULTIMEDIALES LERNEN

Multimediales Lernen nutzt mindestens zwei Medien, um für die Computernutzer ansprechende Inhalte zu erstellen. Bei diesen Medien handelt es sich beispielsweise um Texte, Animationen, Grafiken und Video- oder Audiodateien in Kombination miteinander.

Dies ermöglicht es den Lernenden, auf viele weitere Möglichkeiten bzw. Medien zuzugreifen, um ihren individuellen Lernstil zu pflegen [18]. Der Grundgedanke dessen besteht darin, dass die Studierenden effektiver lernen, wenn ihnen das Lehrmaterial in unterschiedlichen und sinnvoll miteinander kombinierten Formaten zur Verfügung gestellt wird [19].

In der vorliegenden Studie kam das sogenannte *Dual Coding* zum Einsatz.

Das *Dual Coding* wird auch als „kognitive Theorie des multimedialen Lernens“ oder als „Multimediaprinzip“ bezeichnet und geht von unterschiedlichen Systemen der Text- und der Bildverarbeitung aus. Bei Bildern kann es sich sowohl um statische Grafiken wie Fotos, Zeichnungen, Karten, Statistiken oder Diagramme und Tabellen als auch um dynamische Grafiken wie Bilder, Videos oder Animationen handeln. Diese werden über den visuell-bildhaften Kanal aufgenommen, Musik und gesprochene Sprache hingegen über den verbal-auditiven Kanal.

Die kognitive Theorie des multimedialen Lernens wurde 1986 von Paivio von der University of Western Ontario als Grundlage der dualen Codierung von Informationen ins Leben gerufen. Paivio entdeckte, dass bessere Gedächtnisleistungen hervorgebracht werden, wenn Informationen sowohl visuell als auch verbal codiert werden [20]. Baddeley stützte 1992 diese Theorie mit seinem Modell des Arbeitsgedächtnisses [21]. Der Reiz wird gespeichert und sich dessen später besser erinnert [22].

Eine weitere Lehrmethode, die in dieser Studie Anwendung fand, ist das sogenannte *Discrimination Training/Learning*, auf Deutsch „Diskriminationslernen“. Dieses soll das Urteilsvermögen durch Vergleiche idealer Objekte mit weniger guten schärfen. Jede Lerneinheit sollte damit beginnen, dass die Studierenden genau erkennen, wie das ideale Endprodukt später aussehen soll [3]. Sie sollen dadurch relevante von irrelevanten Umgebungsreizen unterscheiden lernen [23]. Das Diskriminationslernen spielt sowohl beim Lernen in der Schule als auch beim sozialen Lernen eine wichtige

Rolle, beispielsweise um den Weg zur Schule zu finden, um Buchstaben zu erkennen und ähnliche voneinander unterscheiden zu können oder um Gefühlszustände beim Gegenüber zu unterscheiden [24].

Das Diskriminationslernen wird durch verbale Umschreibungen verbessert [24]. Rückmeldungen über das zu erwartende Ergebnis sind ein sehr wichtiger Bestandteil des Lernprozesses [25]. Narciss et al. bestätigten zudem, dass das korrekte Lösen von Aufgaben in einer derzeitigen oder auch einer zukünftigen Lernsituation durch das Anbieten von Lösungen für die aktuelle Aufgabe aus externen Informationsquellen ermöglicht wird [26].

### **2.1.3 ZAHNMEDIZINISCHE LEHRE**

In Deutschland basiert die zahnärztliche Lehre bis einschließlich zum Sommersemester 2020 auf der „Approbationsordnung für Zahnärzte“ (ZApprO) vom 01.05.1955. Die ZApprO wurde in den letzten Jahren vom Bundesministerium für Gesundheit gemeinsam mit den Ländern und den entsprechenden Verbänden überarbeitet und an den Bundesrat weitergeleitet. Die überarbeitete ZApprO sieht u. a. eine gemeinsame zahnmedizinisch-humanmedizinische Vorklinik vor. Zum 1. Oktober 2020 war diese neue Approbationsordnung geplant. Aufgrund Covid-19 und der damit veränderten Situation auch an den Universitäten wird sie nun um ein Jahr später eingeführt. Die bisherige Approbationsordnung von 1955 findet aber weiterhin für alle Zahnmedizinistudierenden die bis dahin ihr Studium beginnen Anwendung.

#### **a) Aufbau des Studiums/ZApprO von 1955**

Das Studium der Zahnmedizin setzt sich an allen 30 Universitäten in Deutschland aus einem vorklinischen und einem klinischen Teil zusammen, die jeweils aus fünf Semestern bestehen. Der vorklinische Teil besteht vorwiegend aus naturwissenschaftlichen und prothetischen Fächern. Die Vorklinik soll die Basis für die Arbeit am Patienten liefern. Einen großen Stellenwert im Rahmen der prothetischen Ausbildung der Zahnmedizin nimmt die Zahntechnik ein.

Am Beginn des Studiums steht der technisch-propädeutische Kurs, in dem die Grundlagen der Zahnersatzkunde und der Zahntechnik vermittelt und praktiziert werden. Hier werden Gipsmodelle, Kronen und Prothesen erstellt. Weitere praktische Kurse in der Vorklinik sind der Phantom-I- und der Phantom-II-Kurs. In diesen Kursen arbeiten die Studierenden an einem Phantomkopf, an dem sie Zähne präparieren und

Abformungen für Prothesen nehmen. Hier wird bereits die Behandlung von Patienten simuliert. Nach mindestens zwei Semestern erfolgt die erste staatliche Prüfung, die sogenannte naturwissenschaftliche Vorprüfung (Vorphysikum). Sie umfasst die Fächer Physik, Chemie und Zoologie/Biologie.

Nach fünf Semestern erfolgt die Zahnärztliche Vorprüfung (Physikum). Sie umfasst die Fächer Anatomie, Physiologie, Physiologische Chemie und Zahnersatzkunde. In der Prüfung Zahnersatzkunde haben die Studierenden mindestens vier Phantomarbeiten möglichst unterschiedlicher Art auszuführen. Im mündlichen Teil der Prüfung müssen sie gründliche Kenntnisse in Werkstoffen und Herstellungsmethoden von Zahnersatz unter Berücksichtigung der Anatomie und Physiologie der Mundhöhle nachweisen (§ 28 ZApprO).

Im klinischen Abschnitt des Studiums steht die praktische Arbeit am Patienten im Vordergrund. Neben den zahnmedizinischen Kernfächern, die die Bereiche Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten sowie Chirurgie, Kieferorthopädie, konservierende Zahnheilkunde und Prothetik umfassen, werden die Grundlagen der allgemeinmedizinischen Krankheitslehre unterrichtet.

Nach erfolgreichem Abschluss des klinischen Studienteils kann die Zahnärztliche Prüfung als Abschlussprüfung abgelegt werden. Diese umfasst laut § 40 ZApprO:

- I. Allgemeine Pathologie und pathologische Anatomie
- II. Pharmakologie
- III. Hygiene, medizinische Mikrobiologie und Gesundheitsfürsorge
- IV. Innere Medizin
- V. Haut- und Geschlechtskrankheiten
- VI. Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
- VII. Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
- VIII. Chirurgie
- IX. Zahnerhaltungskunde
- X. Zahnersatzkunde
- XI. Kieferorthopädie

### **b) Reformierung der Approbationsordnung von 1955**

Ab Oktober 2021 verkürzt sich der vorklinische Anteil von vormals fünf auf vier Semester und der klinische Teil verlängert sich von fünf auf sechs Semester. In der Vorklinik wird künftig das medizinische und zahnmedizinische Grundlagenwissen über die Körperfunktionen vermittelt. Hier soll eine Angleichung der Studiengänge Medizin und Zahnmedizin erfolgen. Beendet wird die Vorklinik mit der Ärztlich-Zahnärztlichen Prüfung. Die Klinik teilt sich in zwei Teile. Im fünften und sechsten Semester erfolgt die Ausbildung am Phantomkopf, ab dem siebten Semester startet die Behandlung am Patienten. Weitere Neuerungen sind:

- Absolvierung eines erste Hilfe Kurses
- Ein einmonatiger Krankenpflegedienst
- Eine vierwöchige Famulatur in einer Zahnarztpraxis

Die staatlichen Prüfungen erfolgen nach dem vierten, dem sechsten und zehnten Semester. Die Ausbildungsinhalte wurden neu gewichtet. Unter anderem wurde die zahntechnische Ausbildung in der Vorklinik reduziert. Es soll eine Weiterentwicklung hin zur Prävention, Erhaltung und Therapie oraler Strukturen einschließlich neuer Behandlungstechniken stattfinden. Zudem sollen Allgemeinerkrankungen besser in der zahnmedizinischen Lehre abgebildet werden. Die Ausbildung soll mit Seminaren fächerübergreifend sein. In der Vorklinik sollen Seminare eingeführt werden, die einen klinischen Bezug vermitteln und im klinischen Abschnitt sollen Seminare die Kurse Zahnerhaltung und Zahnersatz zusammenführen. Des Weiteren wird die Betreuungsrelation von Lehrenden zu Studierenden im Phantomkurs von 1:20 auf 1:15 und im Patientenkurs von 1:6 auf 1:3 verbessert. Der Strahlenschutz wird ebenso wie das wissenschaftliche Arbeiten in der Ausbildung gestärkt [27].

Wie oben bereits erwähnt, wurde der zahntechnische Teil der Ausbildung mit der neuen Approbationsordnung reduziert. Dies beinhaltet auch die Aufstellung einer Teilprothese, die in dieser Arbeit als ausgewählte Aufgabe zur Untersuchung des digitalen Feedbacks ausgewählt wurde. Im Folgenden wird nochmal kurz auf die ideale Aufstellung/Verzahnung sowie den Ablauf der Herstellung einer Teilprothese eingegangen.

## **2.2 OKKLUSIONSPRINZIP UND IDEALE ZAHNAUFSTELLUNG EINER TEILPROTHESE**

### **2.2.1 NATÜRLICHE VERZAHNUNG**

Das Verwenden eines allgemeingültigen Okklusionskonzeptes bei jedem Patienten wird als problematisch betrachtet. Eine große Individualität und Freiheit der Okklusion in der Zentrik ist beim physiologischen Gebiss auffallend. Ein dauerhafter Behandlungserfolg kann deshalb nur mit einem individuell auf den Patienten abgestimmten Konzept zu einem Erfolg führen. Wichtig ist ein durchdachtes Konzept bei der okklusalen Gestaltung, da sich der komplexe Bewegungsablauf sowohl in der Horizontal-, Sagittal- und Frontalebene des Schädels abspielt. In der Horizontalebene spricht man bei den Grenzbewegungen von der Laterotrusions- und Mediotrusionsseite. In der Sagittalebene muss die maximale Okklusion (Interkuspitation/IKP) beachtet werden [28]. Für die exzentrische Beziehung, das Arbeiten der Kiefer gegeneinander, gibt es grundsätzlich drei Konzepte. Zum einen handelt es sich um die bilateral-balancierte Okklusion. Hier haben alle Zähne bei Unterkieferbewegungen Kontakt zu den Oberkieferzähnen. Sie benötigt einen allseitigen und vollausbalancierten Kontakt in jeder Exkursionsstellung [29]. Balancekontakte können im individuellen Fall einen gelenkprotektiven Charakter haben [30]. Des Weiteren gibt es die sogenannte Unilateral-balancierte Okklusion. Hier entstehen bei Seitwärtsbewegungen des Unterkiefers Kontakte im Frontzahnbereich und auf der Laterotrusionsseite. Das dritte Konzept ist die eck- und frontzahngeführte Okklusion. Im günstigsten Fall führen hier bei einer Protrusionsbewegung alle sechs oberen Inzisiven und die Seitenzähne sind entkuppelt. Zumindest aber sollten die Mittleren oberen Frontzähne führen. Bei einer Laterotrusion führt der Eckzahn allein[31]. Dies Konzept sollte auch in der natürlichen Verzahnung vorherrschen, zumindest aber eine unilaterale Gruppenführung [29].

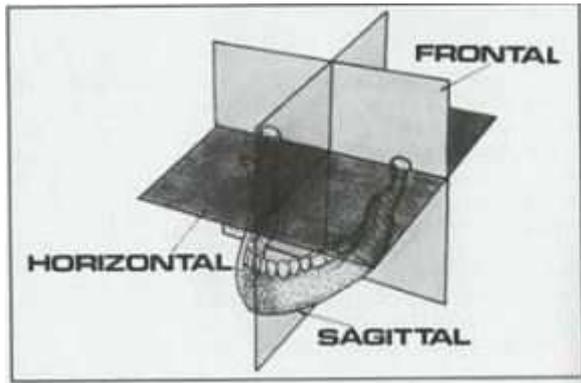


Abb. 1: Die Frontal-, Sagittal- und Horizontalebene des Schädels [29]

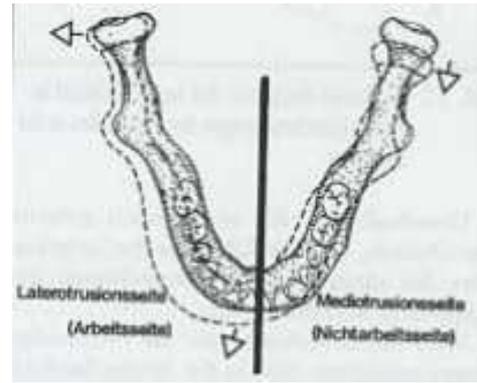


Abb. 2: Die Latero- und Mediotrusionsseite [29]

### 2.2.2 ERSATZMÖGLICHKEITEN MIT TEILPROTHESEN

Durch den Verlust von Zähnen vom vollbezahnten Kausystem bis hin zur Zahnlosigkeit entstehen verschiedene Situationen eines unvollständig bezahnten Gebisses. Laut Kassenzahnärztlicher Bundesvereinigung ist ab einem Verlust von mehr als vier Zähnen oder einer ein- oder beidseitigen Freiendsituation in einem Kiefer eine Versorgung dieses Kiefers mit einer herausnehmbaren Prothese als Regelversorgung indiziert. Bedeutende Einteilungen der verschiedenen Lückengebisse sind Kennedy (1932) und Eichner (1955). Bei Kennedy bezieht sich die Einteilung auf einen Kiefer, wohingegen die Einteilung nach Eichner beide Kiefer zueinander in Beziehung setzt [32]. Bei der topographischen/morphologischen Einteilung nach Kennedy fehlt dementsprechend eine Aussage über die Okklusionsverhältnisse und bei Eichner fehlt die Aussage über die Anzahl der Lücken. Bei der Einteilung nach Kennedy unterscheidet man vier Grundklassen:

I: beidseitig verkürzte Zahnreihe

II: einseitig verkürzte Zahnreihe

III: einseitig, doppelseitig oder mehrfach unterbrochene Zahnreihe

IV: über die Mittellinie reichende frontale bzw. frontolaterale Schaltlücke

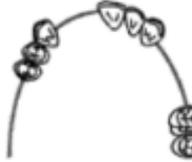
	Klasse I	Klasse II	Klasse III	Klasse IV
Merkmale der Klassen				
Untergruppe 1				
Untergruppe 2				
Untergruppe 3				

Abb. 3: Klassifikation des Lückengebisses nach Kennedy [33]

Die Lückengebissklassifizierung nach Eichner nutzt den antagonistischen Kontakt zwischen Prämolaren bzw. Molaren um den Funktionswert des Restgebisses zu beschreiben. Dazu wird das Gebiss in vier Stützzonen gegliedert:

1. Stützzone: Prämolaren der linken Seite
2. Stützzone: Prämolaren der rechten Seite
3. Stützzone: Molaren der linken Seite
4. Stützzone: Molaren der rechten Seite

Um den Funktionswert des Restgebisses zu beurteilen, werden drei Hauptgruppen unterschieden:

Gruppe A: alle vier Stützzonen weisen antagonistischen Kontakt auf

Gruppe B: antagonistischer Kontakt in weniger als vier Stützzonen

Gruppe C: kein antagonistischer Zahnkontakt [33-35]

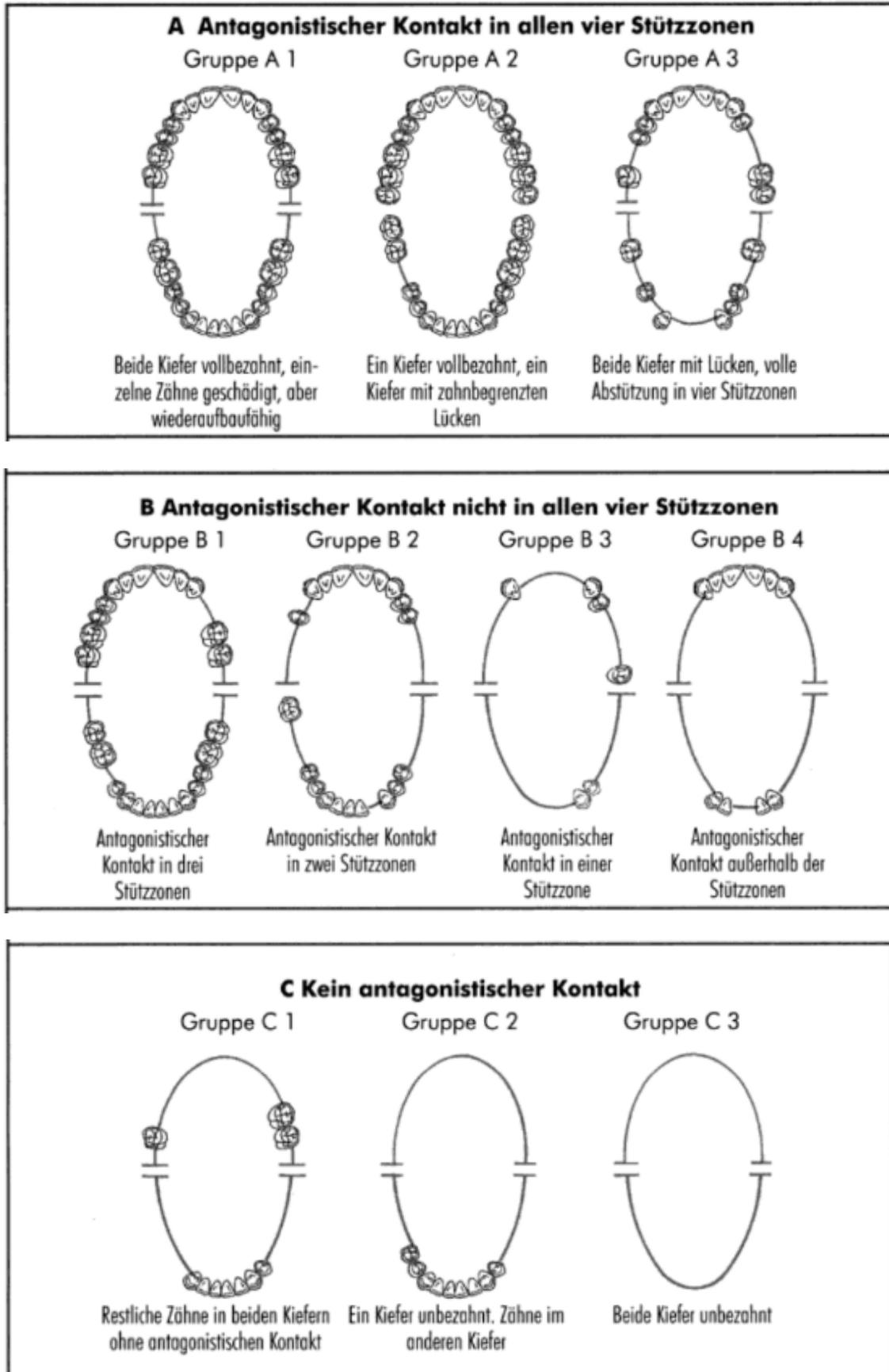


Abb. 4: Klassifikation des Lückengebisses nach Eichner [33]

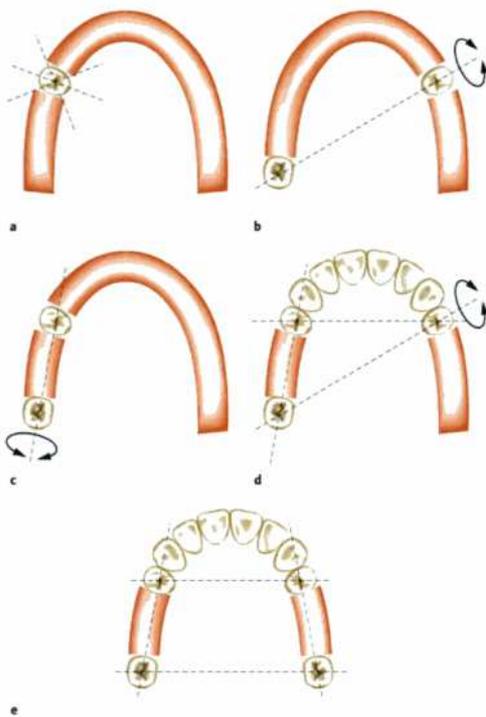
Eine weitere Einteilung der Teilprothesen lässt sich nach der Art der Gewebebelastung (Funktionswert), der Lückengebissstopographie, der Tragedauer und der Abstützmöglichkeit machen. Man unterscheidet bei der Art der Gewebebelastung

- die rein parodontal gelagerte Prothese,
- die rein tegumental (Schleimhaut) getragene Prothese und
- die parodontal-tegumental getragene Prothesen.

Bei der Einteilung nach der Lückentopographie, der Art des Lückengebisses unterscheidet man:

- Freiidprothesen
- Schaltprothesen
- Schließungsprothesen
- Kombinationsprothesen

Freiidprothesen kommen bei den Kennedy-Klassen I und II zum Einsatz, hier unterscheidet man zusätzlich noch einseitige von doppelseitigen partiellen Prothesen. Handelt es sich bei der Lückentopographie um eine Kennedy Klasse III, also eine Unterbrechung der Zahnreihe, finden Schaltprothesen ihre Anwendung. Die Schaltlücken können wiederum ein- oder doppelseitig vorhanden sein. Bei Unterbrechungen der Zahnreihen im Frontzahnbereich verwendet man sogenannte Schließungsprothesen. Kombinationsprothesen sind indiziert, wenn eine Kombination aus verkürzter und unterbrochener Zahnreihe vorliegt [36]. Anhand der Tragedauer lässt sich zudem eine Einteilung in eine Interimsprothese und eine definitive Prothese machen. Eine Interimsprothese ist auf einen Tragezeitraum als provisorisch abnehmbarer Zahnersatz beschränkt während eine definitive Prothese zeitlebens getragen werden kann [37]. Eine weitere Einteilung von partiellen Prothesen ist die nach deren Abstützungsmöglichkeit. Diese hängt grundsätzlich vom Restzahnbestand ab. Eingeteilt wird hier in eine quadranguläre-, eine trianguläre-, eine tangential-periphere-, eine diagonal-zentrale- und eine punktuelle Abstützung. Die lineare wird zudem in sagittal (anterior/posterior), diagonal und transversal gegliedert [38].



- a) Punktförmige Prothesenabstützung
- b) Diagonal-zentrale Stützlinie
- c) Tangential-periphere Stützlinie
- d) Trianguläres Stützfeld
- e) Quadranguläres Stützfeld

Abb. 5: Abstützungsformen von Teilprothesen nach Gernet et. Al. [39]

Hinsichtlich der Konstruktionselemente besteht jede partielle Prothese grundsätzlich aus vier konstruktiven Anteilen. Hierbei handelt es sich um den Prothesensattel, dem großen Verbinder, dem kleinen Verbinder und den Verankerungselementen. Der Prothesensattel liegt, wie der Name schon sagt dem Kieferkamm sattelartig auf und trägt die Kunststoffzähne [33]. Die Verbindungselemente verbinden verschiedene Sattelteile einer Prothese miteinander. Große Verbinder verbinden Prothesensättel beider Kieferhälften, kleine Verbinder fügen Sattelteile einer Kieferhälfte beziehungsweise einen frontalen mit einem lateralen Sattelteil zusammen. Bei den Verankerungselementen unterscheidet man direkte von indirekten Verankerungen. Direkte Verankerungselemente sind gebogene oder gegossene Klammern, indirekte Verankerungselemente sind Geschiebe und Doppelkronen. Es lassen sich ebenso wie mit feststehendem Zahnersatz verschiedene Funktionen wiederherstellen. Dazu zählen die Wiederherstellung der Kaufunktion, der Phonetik ebenso wie die Wiederherstellung der Ästhetik. Auch das stomatognathe System wird durch den Ersatz mit einer Teilprothese vor weiteren direkten oder auch indirekten Destruktionen bewahrt [32].

### 2.2.3 LERNZIELE FÜR STUDENTEN BEI DER TEILPROTHESE

Ziel einer Teilprothese, ist eine Rehabilitation der Kaufunktion. Zur Aufstellung der Seitenzähne einer Teilprothese in maximaler Interkuspitation ist es wichtig zu wissen, wo genau die Zähne platziert werden müssen. Hierzu gibt es im Unterkiefer einige statische Linien die berücksichtigt werden müssen. Der Oberkiefer wird dann dagegengestellt. Die Aufstellung wird Zahn für Zahn in Antagonistenpaarungen durchgeführt. Als statische Linien finden sich zum einen die Okklusionsebene, die sagittale Kompensationskurve und die transversale Kompensationskurve. Auch die Zentralfissuren der unteren Seitenzähne bilden eine gerade Linie. Diese Linie deckt sich mit der Kieferkammmitte.

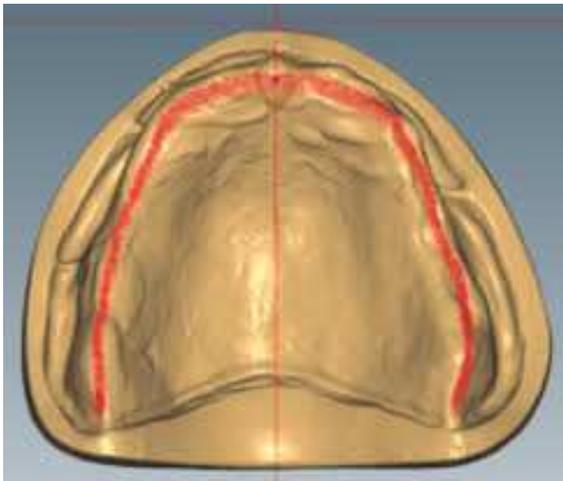


Abb. 6: Kieferkammmitte Oberkiefer

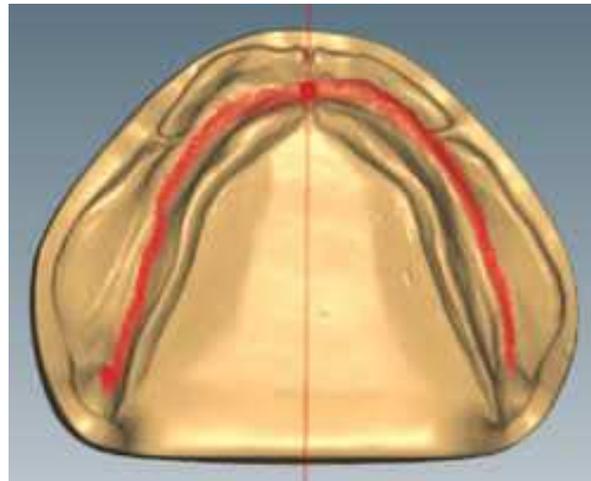
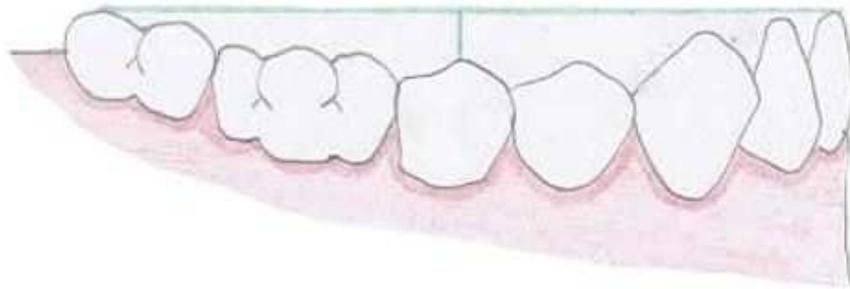


Abb. 7: Kieferkammmitte Unterkiefer

Die Okklusionsebene führt durch den Inzisalpunkt und die distobukkale Höcker der zweiten Unterkiefer-Molaren[40]. Die Okklusionsebene ist fixiert durch den distobukkale Höcker der Zähne 37 und 47 und dem Inzisalpunkt.



**Abb. 8: Okklusionsebene**

Die sagittale Kompensationskurve ist die Verbindungslinie der Inzisalkanten der Unterkiefer-Frontzähne und den Höckerspitzen der Unterkiefer-Seitenzähnen in sagittaler Richtung. Ihr tiefster Punkt befindet sich laut Cheon et. al. auf Höhe des zweiten Prämolaren [41]. Shannon und Nanda bezeichnen den mesio-bukkale Höcker des ersten Molaren als tiefste Stelle der Kompensationskurve [42]. Der tiefste Punkt wird als Kauzentrum bezeichnet.

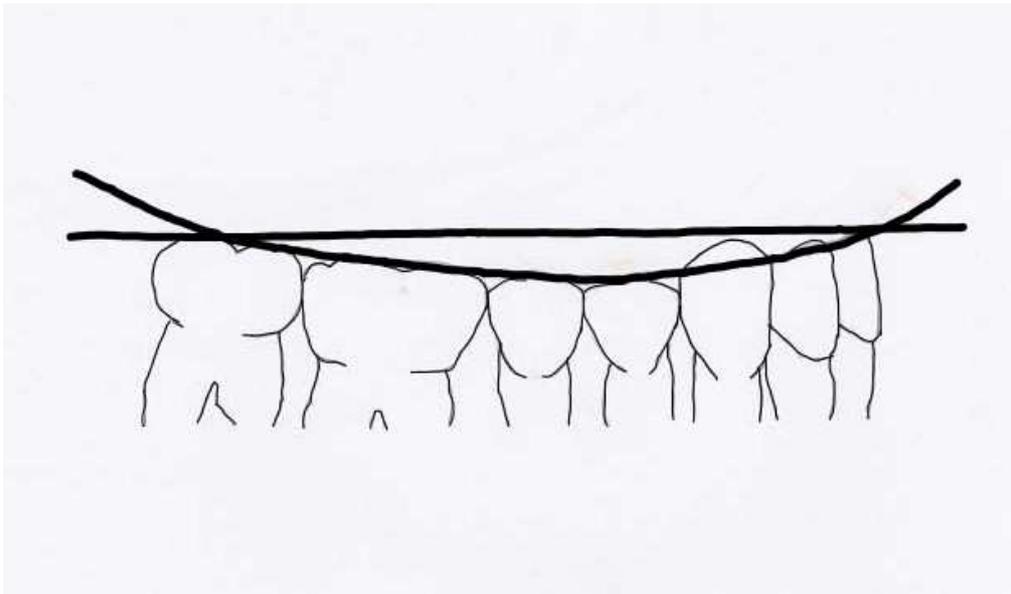


Abb. 9: Spee-Kurve (sagittale Kompensationskurve)

Die transversale Kompensationskurve, auch als Wilson-Kurve bezeichnet, entsteht durch die Kronenflucht der unteren Prämolaren und Molaren, d.h. diese Zähne sind alle etwas nach lingual gekippt. Diese Kurve nimmt nach distal ab [34].

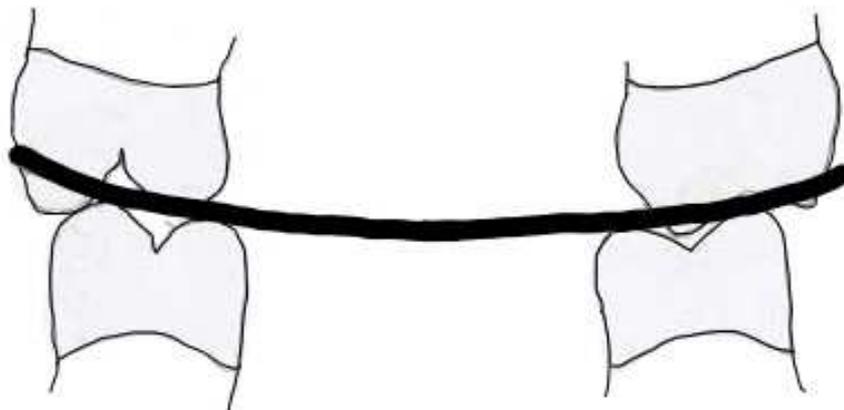


Abb. 10: Wilson-Kurve

Um eine maximale Interkuspitation zu erhalten, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, den Unter- und Oberkiefer in eine Kontaktbeziehung zu bringen. Eine

Möglichkeit sind die Flächenkontakte, die in etwa einem abradierten Gebiss eines stressgeplagten Menschen gleichen. Diese Möglichkeit findet Verwendung, wenn man die künstlichen Zähne den vorhandenen natürlichen (hier abradierten) Gebiss anpassen möchte. Hierbei werden die Zähne aber nicht in ihrer physiologisch günstigsten Form belastet und können zum vermehrten Knirschen reizen und die Kauarbeit erschweren [29]. Eine weitere Möglichkeit ist der Höckerspitzen-Fossa-Kontakt. Die Höckerspitzen verzahnen hier direkt mit der Fossa ihres Antagonisten. Diese Form von Verzahnung ist aber lediglich eine vom Prothetiker entwickelte Art, die leicht herzustellen ist und leicht in ihrer Handhabung ist. Dieses Konzept findet Anwendung, wenn ein Gleiten im Seitenzahnbereich angestrebt wird. Die Verzahnungsmöglichkeit Höcker-Fossa-, Höcker-Randleisten-Kontakte ist eine weitere Form um eine maximale Interkuspitation herzustellen. Diese Form findet man in natürlichen Gebissen am Häufigsten. Hierbei handelt es sich um eine Zahn-zu-zwei-Zahn-Okklusion. Vorteile dieser Verzahnung sind, dass die Zähne in ihrer Position fixiert sind und axial belastet werden. Voraussetzung für diese Form ist aber eine störungsfreie Front- und Eckzahnführung [43]. Ein Nachteil dieser Form der Verzahnung besteht im Höcker-Randleisten Kontakt. Hier besteht die Gefahr, dass Teile der Speisen in den Interdentalraum geschoben werden und dort eine Entzündung der Gingiva hervorrufen. Dem kann aber Einhalt geboten werden, indem man darauf achtet, dass die Approximalkontakte korrekt gestaltet werden [44]. Auch eine Möglichkeit um die maximale Interkuspitation zu erreichen ist die Gestaltung reiner Höcker-Fossa-Kontakte. Hierbei handelt es sich um eine Zahn-zu-Zahn-Okklusion, da jedem Zahn jeweils nur ein Antagonist zugeordnet wird. Ein Höcker-Randleisten-Kontakt existiert hier nicht und somit besteht auch keine Gefahr, dass sich eventuelle Speisereste in den Interdentalraum verdrängen lassen. Wenn man dieses Konzept anwendet kann man aber nicht von einem dauerhaften Zustand ausgehen, da es durch Zahnverlust, durchbrechende Weisheitszähne, Zungen- oder Lippenpressen zu einer Veränderung der Zahnstellung kommen kann [29]. Hinsichtlich des okklusalen Führungsmusters sollten primär die vorhandenen, individuellen Muster berücksichtigt werden. Bei komplexen prothetischen Restaurationen im posterioren Bereich sollte der Front-Eckzahnführung Vorrang gegeben werden um die Restaurationen zu schützen [45]. Dieses Konzept der Führung ist das bevorzugte Konzept bei einer umfangreichen prothetisch-restaurativen Versorgung. Sollte diese Art der Führung aus

verschiedensten Gründen nicht möglich sein, sollte zumindest eine unilaterale Gruppenführung angestrebt werden [29].

Insgesamt sollte das Lehrziel der vorklinischen Ausbildung in Bezug auf die Aufstellung von Zähnen bei partiellen Prothesen folgende Punkte umfassen:

- Wo müssen die künstlichen Zähne stehen?
- Wie müssen sie gestellt/geneigt werden?
- Welche Okklusionsform ist richtig?
- Welches Okklusionsmuster verwende ich wo?
- Wie setze ich die Wachsprothese in Kunststoff um?
- Mögliche Fehlerquellen?

Teilprothetische Versorgungen sollten immer in einer stabilen Front-Eckzahn-Führung oder der unilateral balancierten Führung aufgestellt werden, solange entweder sowieso eine Front-Eckzahn-Führung gegeben ist oder eine stabile Rekonstruktion möglich ist, was im Normalfall einer paradontalen Lagerung der Teilprothese entspricht [33].

Sollte keine gesicherte oder natürliche Frontzahnsituation mehr vorliegen, wird die Teilprothese dahingehend modifiziert, dass keine Okklusionkontakte in der Front hergestellt werden, um ein Abkippen der Prothese während der Kaubewegungen zu gewährleisten. Hier wird je nach Umfang der Restauration eine unilateral oder sogar bilateral geführte Okklusion angestrebt. [s.o]

Bei der Interkuspitation einer Total- oder Teilprothese wird eine maximale Vierpunktkontakt Okklusion bevorzugt.

## **2.3 BISHERIGE BEWERTUNGSKRITERIEN/FEEDBACKMÖGLICHKEITEN IM VORKLINISCHEN STUDENTENKURS**

### **2.3.1 FEEDBACK DURCH WISSENSCHAFTLICHE MITARBEITER**

Im vorklinischen Studentenkurs der Ludwig-Maximilians-Universität München müssen die Studierenden ein Testatheft führen. In diesem Heft sind die einzelnen Arbeitsschritte der verschiedenen Kursarbeiten aufgelistet. Unter anderem findet man hier die einzelnen Teilschritte zur Herstellung der Teilprothese. Diese umfassen als Hauptschritte:

- Modellherstellung
- Klammerbiegen
- Kieferrelationsbestimmung, Einartikulierung
- Zahnaufstellung
- Abgabe der Teilprothese

Die einzelnen Unterpunkte der Hauptschritte müssen vor jedem weiteren Teilschritt von den wM unterschrieben werden. Um diese Unterschrift zu bekommen, muss dieser jeweilige Schritt ordnungsgemäß ausgeführt sein. Hierzu stellen sich die Studierenden in einer Reihe am Assistententisch an um dann zu einem randomisierten wM zu kommen. Die Arbeit wird dann von dem wM beurteilt und der Studierende muss dann gegebenenfalls nachbessern. Nachdem der Studierende dann nachgebessert hat muss er sich erneut am Assistententisch anstellen um wiederum zu einem zufälligen wM zu kommen. Dieser beurteilt dann die Arbeit aus seiner Sicht, eventuell mit einer anderen Gewichtung erneut und weist auf weitere Fehler hin. Dieser Prozess findet solange statt, bis der Studierende alle Unterschriften zu der jeweiligen Kursarbeit gesammelt hat und sie den wM am Abgabetermin zur Korrektur übergeben hat. Die angestellten wM befinden sich zum Zeitpunkt Ihrer Tätigkeit in der Vorklinik meist in Ihrer Assistenzzeit direkt nach dem Studium.

Die Studierenden bekommen ihr Feedback aufgrund der Einschätzung des wM, die von mehreren Faktoren (subjektiv wie objektiv) beeinflussbar ist. Zuallererst spielt die Erfahrung des jeweiligen wM eine entscheidende Rolle. Abhängig von der Anzahl der bereits begleiteten Studentenkurse ergibt sich hier auch für die wM eine Lernkurve, in der wM mit den verschiedensten Problemen der Studierenden sowie unterschiedlichen Aufstellungen ein Erfahrungsschatz gewonnen werden kann. Außerdem spielt die zahntechnische Vorausbildung der wM eine entscheidende Rolle. Mitarbeiter mit einer voruniversitären Berufslaufbahn als Zahntechniker können auf einen ganz anderen Wissensstand zugreifen als gerade examinierte wM, die bisher nur in der universitären Ausbildung mit zahntechnischen Themen konfrontiert wurden.

### **2.3.2 FEEDBACK DURCH HILFSMITTEL**

Des Weiteren gibt es allerdings auch objektivere Faktoren, die das Feedback für die Studierenden bei der Aufstellung einer Teilprothese beeinflussen. Eine genaue Überprüfung der statischen und dynamischen Kontakte kann die Okklusionsfolie geben. Diese ca. 12 µm dicke Folie wird in verschiedenen Farben verwendet. Dem

Studierenden werden die Kontakte sowohl in der Zentrik als auch in der Dynamik auf dem Zahnersatz angefärbt und geben ihm ein direktes Feedback der Lage. Dies vergleicht der Studierende einfach mit der vorher eingeführten idealen Aufstellung der Zähne und kann sofort etwaige Korrekturen durchführen. Zum abschließenden Okklusionstest kann noch eine Shimstockfolie ohne farbliche Beschichtung verwendet werden. Diese Folie ist mit 8 µm noch einmal erheblich dünner als die normalen Okklusionspapiere und zeichnet sich durch eine hohe Reißfestigkeit aus. Hiermit lässt sich ein gleichmäßiger Kontakt an allen Zähnen überprüfen. Bei leicht geschlossener Zahnreihe sollte die Folie durchziehbar sein, wohingegen bei verstärktem Muskeltonus (im Artikulator wird dieser einfach geschlossen) ein zirkulärer, fester Halt der Folie gegeben sein sollte.

Vor der Aufstellung der Zähne können die Studierenden die korrekte Artikulation der Modelle bereits am Artikulator überprüfen. Mit Hilfe von Gummibändern an den entsprechenden Einkerbungen am Stift und den Kondylen des Artikulators kann eine Einhalten der verschiedenen Ebenen und die korrekte Stellung der Modelle in diesen Ebenen gewährleistet werden. Dies ist Grundvoraussetzung, um eine passende Aufstellung der Zähne sowohl in der Zentrik als auch in der Dynamik zu schaffen.

Beide Punkte, sowohl das korrekte Einartikulieren als auch die stimmige Verteilung der Kontaktpunkte, können mit denselben Hilfsmitteln beim wM überprüft werden.

Das grundlegendste und klassischste Feedback bekommt der Studierende allerdings durch sein visuelles Wahrnehmen. Eine genaue Überprüfung der verschiedenen Abschnitte einer Teilprothesenherstellung ist unerlässlich. Prothesenzähne abseits der Kieferkamm-Mitte sowie außerhalb der Okklusionsebene oder Zähne in Non-Okklusion geben dem Studierenden sofort das Feedback, eine Neuaufrichtung der entsprechenden Zähne durchzuführen. Visuelle Hilfsmittel wie Lupenbrillen oder Stirnlampen können einen Effekt haben, um kleine Aufstellungsfehler schnell zu erkennen. Allerdings ist die Hilfe hier, im Gegensatz zu anderen technischen und zahnmedizinischen Arbeiten wie das Präparieren eines Zahnes oder die feine Freilegung eines Kronenrandes am Gipsmodell, begrenzt. Dennoch sollte der Arbeitsplatz eines Studierenden gut ausgeleuchtet sein, um auch kleine, nicht so offensichtliche Fehler in der Aufstellung bei genauer Betrachtung erkennen zu können.

### **2.3.3 FEEDBACK DURCH MITSTUDENTEN**

Eine weitere, nicht zu vernachlässigende Feedback-Möglichkeit für den Studierenden ist der Kurs selbst. Mitstudierende können ein starker Faktor sein, um bei der Zahnaufstellung Hilfen zu geben. Auch bei den Mitstudierenden herrscht allerdings ein unterschiedlicher Ausbildungsstand. Studierende mit abgeschlossener Zahntechnikerlehre und Erfahrung im Beruf sowie Studenten mit besonders gutem theoretischem Vorwissen können eine Feedbackfunktion über den Stand der Aufstellung sein. Natürlich kann dies für den Studierenden auch zum Nachteil gereichen, wenn er sich ausschließlich auf die Meinung seines Kursnachbarn verlässt. Somit ist dies eine sehr unsicherer, aber nicht außer Acht zulassende Form des Feedbacks. Eine Möglichkeit hier eine Verbesserung herbeizuführen, wäre die Einführung eines Tutor-Systems ähnlich wie in der Schule. Studierende aus höheren Semestern könnten, soweit es zeitlich in ihren Lehrplan passt, in den Kursen der unteren Semester eine Ansprechstation für den Studierenden bilden. Dies würde auch zu einer Entlastung der wM führen, die für die wichtigen, bereits oben genannten Teilabschnitte bei der Herstellung der Prothese zur Verfügung stehen würden. Eine weitere Verbesserung könnte die Gruppierung der Studierenden in kleine, 3 bis 4 große Gruppen sein. Hier könnten sich die Studierenden ein gegenseitiges Feedback geben und miteinander Erfahrungen bei der Aufstellung sammeln sowie Fehler erkennen.

### **2.3.4 FEEDBACK DURCH ZAHNTECHNIKER**

Während des Herstellungsprozesses der einzelnen Kursarbeiten sind immer ein bis zwei Zahntechniker zusätzlich zu den wM anwesend. Sie unterstützen die Studierenden ebenfalls mit Beurteilungen der einzelnen Arbeitsschritte. Zusätzlich werden von ihnen noch Live Demonstration durchgeführt. Hierzu werden die jeweiligen aktuellen Schritte per Videokamera vom Tisch des Zahntechnikers auf die Monitore der einzelnen Laborplätze der Studierenden übertragen. Auch sogenannte Demomodelle zu einzelnen Teilschritten werden von den Zahntechnikern hergestellt und zur Anschauung zur Verfügung gestellt. Vor allem bei der Umsetzung der aufgestellten Wachsprothese in Kunststoff sind sie das wichtigste Feedback-System. Die richtige Verarbeitung von Kunststoff ist praktisch und erfahrungsbedingt. Hier können Fehler, vor allem das Verpressen der Zähne während des Polymerisationsvorganges, durch die Zahntechniker frühzeitig erkannt werden. Da bei

diesem Abschnitt der Prothesenherstellung keine Korrektur oder Neupressung möglich ist, sind die Studierenden hier sehr stark auf die anwesenden Zahntechniker angewiesen, um sie bei der Umsetzung zu begleiten. Auch hier könnte ein Tutor-System mit Studierenden höheren Semester unterstützen.

### **2.3.5 BEREITS VORHANDENE DIGITALE HILFSMÖGLICHKEITEN (IN VORLESUNG ETC.)**

Neben den bereits erwähnten Live-Demonstrationen über die Laborbildschirme gibt es zusätzliche digitale Hilfsmöglichkeiten. Zu erwähnen sind hier Filme und Animationen die während einer Vorlesung gezeigt werden um den Studierenden die Aufgabenstellung näher zu bringen. Des Weiteren werden zusätzliche Filme auf der Online Plattform moodle® der zahnmedizinischen Fakultät bereitgestellt, um sich zu Hause auf die nächsten Schritte vorbereiten zu können. Echte digitale Feedback-Möglichkeiten hat der Studierende bisher nicht.

### **3. ZIELSETZUNG**

Das Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob die Verwendung digitaler Hilfsmittel zur besseren Veranschaulichung und objektiveren Bewertung den Studierenden im vorklinischen technisch-propädeutischen Kurs an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität dabei hilft, Arbeiten – hier die Zahnaufstellung in Teilprothesen – herstellen zu können.

Konkret sollten die folgenden Hypothesen überprüft werden:

1. Die digitale Unterstützung und 3-D-Auswertung üben keinen Einfluss auf die Zahnaufstellung der hergestellten Teilprothesen aus.
2. Die digital ausgewerteten Parameter üben einen Einfluss auf die Zahnaufstellung der hergestellten Teilprothesen aus.

Alle 132 Studierenden der beiden Semester wurden bei der Herstellung ihrer Teilprothesen begleitet. Davon nahmen 117 Studierende an der Studie teil. Drei Tage nach dem Einartikulieren der Arbeit fand der erste Scandurchgang statt. Für die praktische Evaluation der Auswirkungen einer objektiven Einschätzung der Arbeiten wurden 56 Studierenden die Ergebnisse der Digitalisierung ihrer Teilprothesen mitgeteilt. Diese Studierenden konnten zusätzlich zur traditionellen Lehre mit der Unterstützung durch die Assistenzärzte und Zahntechniker die ermittelten digitalen Daten ihrer Prothesen verwenden, um diese fertigzustellen.

Zu diesem Zweck wurden die Teilprothesen der 117 Studienteilnehmer aus dem ersten Fachsemester zu verschiedenen Zeitpunkten der Fertigung eingescannt. Anschließend wurden die Daten ausgewertet und der Gruppe mit dem digitalen Feedback (Digitales-Feedback-Gruppe) zur Verfügung gestellt.

Der anderen Gruppe (Referenzgruppe) wurden ihre Teilprothesen ohne das Wissen, wie die digitale Auswertung ausgefallen war, wieder ausgehändigt. Beide Gruppen konnten nun mit der Fertigstellung der Teilprothesen und mit Unterstützung durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter (wM) der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität fortfahren. Die Digitales-Feedback-Gruppe hatte hierbei zusätzlich die Unterstützung durch die digitale Auswertung. Nachdem die Studierenden die Teilprothesen fertiggestellt hatten, wurden diese erneut eingescannt und ausgewertet, um zu evaluieren, welche der beiden Gruppen näher an der Referenzteilprothese war.

## **4. MATERIAL UND METHODE**

### **4.1 ÜBERSICHT**

Von Oktober 2012 bis April 2013 nahmen 132 Studierende mit dem technisch-propädeutischen Kurs den Studiengang Zahnmedizin an der Ludwig-Maximilians-Universität auf. Im Wintersemester 2012/2013 waren dies 71 Studierende, 44 (62,0 %) Studentinnen und 27 (38,0%) Studenten. Im Sommersemester 2013 begannen 39 (63,9 %) Studentinnen und 22 (36,0 %) Studenten mit diesem Kurs.

Zum Bestehen dieses Kurses müssen die Studierenden mehrere zahntechnische Arbeiten anfertigen, wozu auch die Herstellung einer Teilprothese gehört. An der Ludwig-Maximilians-Universität fertigen die Studierenden eine Kunststoffteilprothese im Oberkiefer mit drei handgebogenen Klammern (V2A-Chrom-Nickel-Stahl) als Halteelementen an.

Die Studierenden wurden zusätzlich zum praktischen Teil auch theoretisch unterrichtet. Hierzu zählten fünf Vorlesungen und zwölf Livedemonstrationen der Teilschritte der Fertigung einer Teilprothese. Zudem erhielten die Studierenden weiterhin Auswertungen und Verbesserungsvorschläge der wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität sowohl in mündlicher als auch in praktischer Form. Als Anschauungsmodell wurde eine Referenzteilprothese in Kunststoff mit optimaler Zahnaufstellung, okklusalen Kontakten und Politur von einem Zahntechnikermeister zur Verfügung gestellt.

Für den Ablauf der Studie wurden die Studierenden in zwei Gruppen eingeteilt. Die eine Gruppe erhielt den traditionellen Unterricht (Referenzgruppe), die andere nach dem ersten Einscannen ihrer Arbeiten zusätzlich zum traditionellen Unterricht ein digitales Feedback (Digitales-Feedback-Gruppe). Das digitale Feedback bestand aus einem farblich codierten Printout (Dual Coding) der Überlagerung ihrer Teilprothese in Wachs, drei Tage nach dem Einartikulieren, mit der optimal aufgestellten Teilprothese in Wachs (aus okklusaler, vestibulärer und palatinaler Ansicht).

## **4.2 HERSTELLUNG DER TEILPROTHESE**

### **4.2.1 HERSTELLUNG DER DOUBLIERFORM**

Um die Teilprothesen anfertigen zu können, benötigten die Studierenden zunächst ein Gipsmodell mit einem teilbezahnten Kiefer und dem dazugehörigen Gegenkiefer.

Zur Herstellung dieser Gipsmodelle wurden Silikonmodel (Ober-/Unterkiefer) mit den entsprechenden Vorgaben benötigt. Diese Silikonmodel wurden vor dem Beginn der Studie hergestellt. Als Ausgangsmodell für die Model dienten ein teilbezahntes Oberkiefermodell (Frasaco®-Dentalmodell, Frasaco GmbH, Tettngang) und ein vollbezahnter Gegenkiefer. In dem Frasaco®-Oberkiefermodell wurden in die Klammerzähne 14, 17 und 24 Klammerrauflagen in der Dimension Tiefe = 1,5 mm, Länge = 2,5 mm und Breite = 1/3 der Zahnbreite mit einem Diamanten präpariert. Anschließend begann die Vorbereitung für das Doublieren der Modelle.

### **4.2.2 HERSTELLUNG DER GIPSMODELLE**

Zur Herstellung der Modelle wurden identische Doublierformen mit Superhartgips, Typ IV (HS-Superhartgips Natur®, Henry Schein Dental Deutschland GmbH, Langen) ausgegossen. Durch das Ausgießen identischer Doublierformen vor Beginn der Studie hatten die Studierenden für die spätere Aufstellung der Zähne und die Anfertigung ihrer Teilprothesen dieselbe Ausgangssituation zur Verfügung wie der Zahntechnikermeister, der die Referenzteilprothese damit hergestellt hatte. Vor der Ausgabe der Model an die Studierenden wurden sie erneut genauestens auf etwaige Risse/Schäden überprüft, um mögliche Fehlerquellen in der Studie ausschließen zu können. Nach der Fertigstellung der Gipsmodelle begannen die Studierenden mit dem Biegen der drei E-Draht-Klammern als Halteelemente an den Zähnen 14, 17 und 24.

### **4.2.3 BIEGEN DER E-DRAHT-KLAMMERN**

Zur Herstellung standen den Studierenden Klammerkreuze mit einem Durchmesser von 0,9 mm für die Prämolaren und 1,0 mm für die E-Klammer am Molar mit einer Auflage zur Verfügung. Bevor die Klammern gebogen wurden, mussten die Studierenden den Klammerverlauf und den prothetischen Äquator an den entsprechenden Zähnen 14, 17 und 24 einzeichnen. Hierzu wurde das Modell in ein Parallelometer eingespannt und entsprechend der Einschubrichtung ausgerichtet.

Um die Klammerkreuze entsprechend der gewünschten Form zu biegen, verwendeten die Studierenden mehrere verschiedene Zangen. Hierzu gehörten Aderer-/Dreipunktzangen, Flachspitzzangen, Hohlkehlzangen und Seitenschneider. Um den Abstand von 1,0 mm zum Alveolarfortsatz nicht zu unterschreiten, befestigten die Studierenden in diesem Bereich als Hilfestellung eine 1,0 mm dicke Wachsplatte.

Nachdem die Studierenden die Klammern gebogen hatten, mussten sie diese vor den weiteren Arbeitsschritten den wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität vorzeigen, um eine Beeinträchtigung der Aufstellung durch die gebogenen Klammern und somit der Studienergebnisse zu vermeiden. Danach wurden die Klammern noch auf Hochglanz poliert.

### **4.2.4 EINARTIKULIEREN UND KIEFERRELATIONSBESTIMMUNG**

Nach der Fertigstellung der Modelle und Klammern erfolgten die Kieferrelationsbestimmung und das Einartikulieren. Hierzu wurde jedem Studierenden ein bereits mittelwertig nach der Camperschen Ebene einartikulierte Unterkiefergipsmodell als Einartikulierungshilfe zur Verfügung gestellt.

Zunächst wurde eine Bisschablone im Oberkiefer mit lichthärtenden Kunststoffplatten hergestellt. Dafür wurden die Modelle mit einem Isoliermittel benetzt (Aislar®, Kulzer GmbH, Deutschland), um Abplatzungen zu vermeiden. An den Verbindungsstellen zum späteren Wachswall wurden Retentionen angebracht und die Schablonen 10 min lang im Lichthärteofen (Dentacolor XS®, Kulzer GmbH) polymerisiert.

Auf die polymerisierten Schablonen wurden Wachswälle (Modellierwachs rosa, Orbis Dental, Münster) mithilfe von Klebewachs (Supradent-Klebewachs, Chemisches Dentallabor Oppermann-Schwedler, Bonn) angebracht. Die Arbeitsmodelle wurden mit Artikulationsgips (HS-Artikulationsgips® Natur, Henry Schein, Melville, New York, USA) nach Herstellerangaben in Artikulatoren (SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting, und Artex®, Amann Girrbach GmbH, Pforzheim) einartikuliert.

### **4.2.5 ZAHNAUFSTELLUNG**

Zunächst wurden die zuvor bereits gebogenen Klammern wieder an den entsprechenden Zähnen in der Schalt- und Freierlücke befestigt. Anschließend folgte die Aufstellung der Kunststoffzähne in das Lückengebiss der Kenndey Klasse II1 beziehungsweise Eichner Gruppe B1. Die Studierenden verwendeten die Zahnlinie Pala Mondial (Pala Mondial® Nr. 31, Kulzer GmbH).

Die Zähne wurden entsprechend der Angle-Klasse I, auch „Regelverzahnung“ oder „Neutralokklusion“ genannt, aufgestellt. Hierzu musste der distobukkale Höcker des unteren ersten Molaren in der zentralen Grube des oberen ersten Molaren stehen. Um die optimale Passform der Zähne zu erhalten, wurde Zahn für Zahn nacheinander nach der Antagonistenregel aufgestellt und beschliffen. Der erste Zahn, den die Studierenden beschleifen mussten, war Zahn 15. Als direkt an die Klammer angrenzender Zahn musste dieser sowohl basal als auch mesial beschliffen werden. Um das Verbindungsteil zwischen der Klammer und der Prothesenbasis, den sogenannten Appendix, zu fassen, musste der Zahn zusätzlich ein wenig „ausgehöhlt“ werden.

Zum Prüfen der Okklusion wurde der zuvor an den Kieferkamm, die Nachbarzähne und die Klammer angepasste Zahn 15 mit rosa Plattenwachs am Gips befestigt. Anschließend wurde sowohl mit Shimstock- als auch mit Okklusionsfolie die Okklusion in Statik und Dynamik überprüft. Für das funktionelle Einschleifen wurde eine Okklusionsfolie der Stärke 12  $\mu$  und eine Shimstock-Folie der Stärke 8  $\mu$  benutzt. Zum Einstellen der statischen Okklusion verringerten die Studierenden mit entsprechenden Kunststofffräsen und Diamanten für das Handstück die vorhandenen Kontakte auf den nicht tragenden Höckern so lange, bis eine gleichmäßige Verteilung der Kontaktpunkte im Sinne einer Höcker-Fossa-Höcker-Randleisten Verzahnung vorhanden war. Ziel der Zahnaufstellung war zudem das Herstellen einer Front-, Eckzahnführung.

Für die Teilprothese hatten die Studierenden beider Gruppen 14 Tage halbtags Zeit. Sie sollten nach ca. 10 Tage die Zähne aufgestellt haben damit sie die Wachsprothese noch in Kunststoff umsetzen und diese polieren konnten.

### **4.2.6 ERSTER SCAN**

Drei Tage nachdem die Studierenden ihre Modelle für die Teilprothese einartikuliert hatten, fand der erste Scan mit einem Streifenlichtscanner (KaVo Everest Scan<sup>®</sup>, Software: Everest Scan Control<sup>®</sup>, KaVo) statt. Für die Digitalisierung wurden alle Arbeiten eingesammelt, die diesem Kriterium entsprachen. Alle Studierenden hatten zu diesem Zeitpunkt mindestens einen Zahn aufgestellt. Die Gipsmodelle wurden anschließend mit Okklusionsspray (Arti-Spray<sup>®</sup>, Dr. Jean Bausch GmbH & Co. KG, Köln) eingesprüht, um die Oberflächen zu mattieren, sodass Reflexionen des Lichtstrahls im Streifenlichtmessverfahren, mit dem das Modell digitalisiert wurde, vermieden und präzise Daten ermittelt wurden.



Abb. 11: Modell und Teilprothese, mit Arti-Spray® mattiert

Anschließend wurde das Gipsmodell mit aufsitzender Teilprothese in der Scaneinheit KaVo Everest Scan® montiert. Der Objektträger wurde zusätzlich auf dem Drehteller des Scanners fixiert.



Abb. 12: Modell, auf Objektträger fixiert

Nach dem Befestigen des Modells wurde die dazugehörige Software Everest Scan Control® (Version 8.2.1.11) auf dem entsprechenden Rechner gestartet.

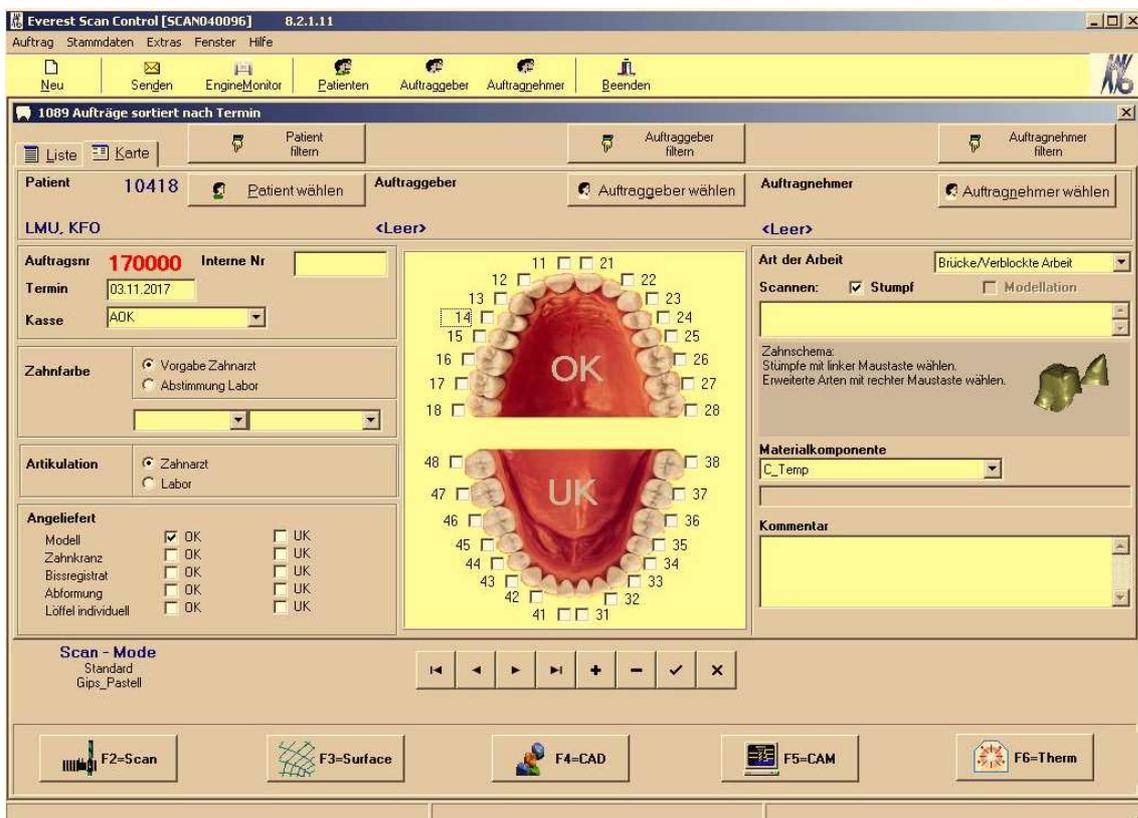


Abb. 13: Startfenster Software Everest Scan Control® (Version 8.2.1.11)

In diesem Startfenster mussten keine weiteren Einstellungen verändert werden, weil das vollständige Gipsmodell mit der dazugehörigen Prothese eingescannt wurde. Nach dem Drücken des Buttons „F2 = Scan“ (Scanmodul) beginnt der Scanprozess. Hierbei werden mit der integrierten CCD-Kamera des Scanners alle Modelle in 3-D im Verhältnis 1 : 1 erfasst.

Bei der Erfassung bewegt sich der Drehteller um seine Vertikal- und um seine Horizontalachse. Dabei werden Punktwolken aus 15 verschiedenen Positionen aufgenommen, die die Rohdaten abbilden. Das Scanmodul optimiert die Oberfläche automatisch [46]. Die Messgenauigkeit liegt bei  $< 20 \mu\text{m}$  [47]. Anschließend wurden die Daten in *Standard-Triangulation-Language*(STL)-Dateien umgewandelt. Bei STL-Dateien handelt es sich um geometrische Angaben von 3-D-Datenmodellen [48].

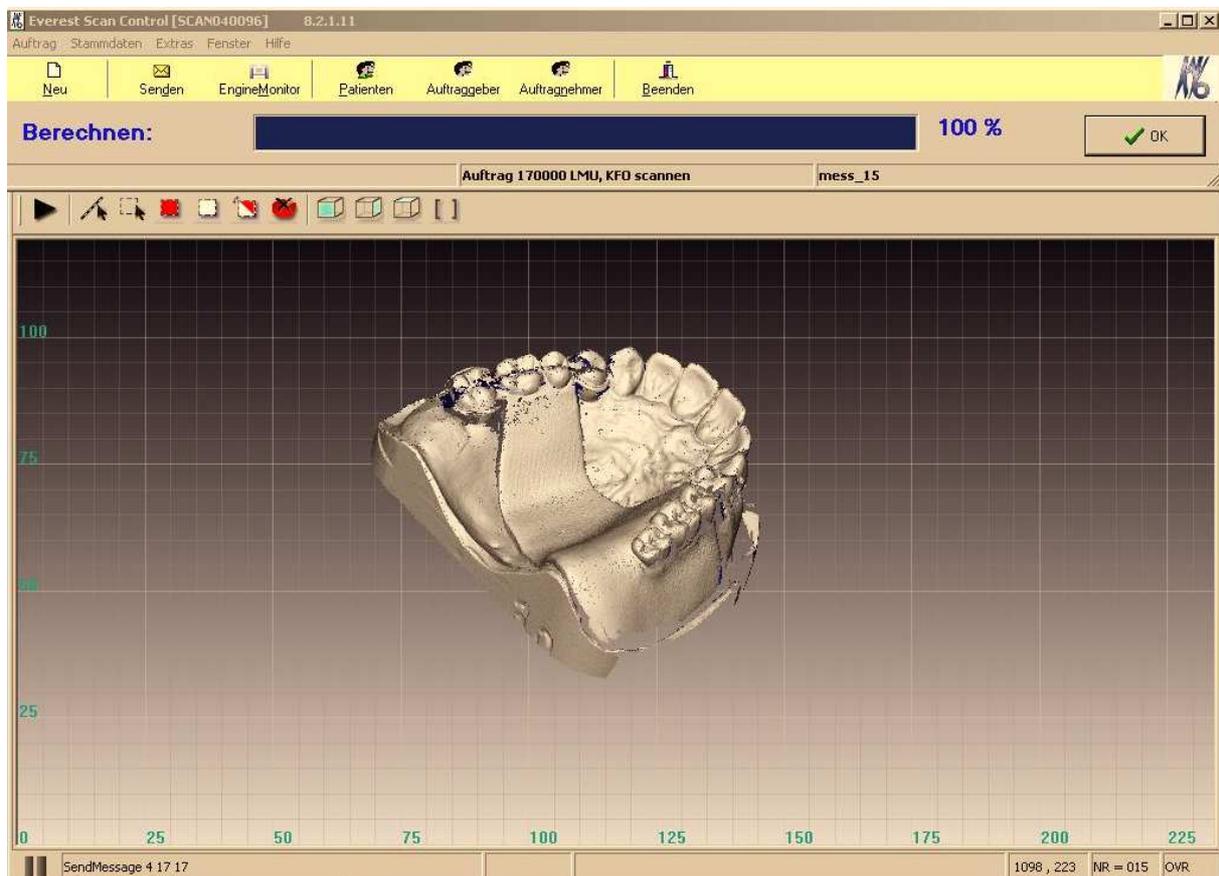


Abb. 14: Scanvorgang der Software Everest Scan Control® (Version 8.2.1.11)

Nach Erreichen von 100 % des Scanvorgangs wurde eine STL-Datei mit den Berechnungspunkten erstellt und abgespeichert. Um die Qualität der Messdaten für die Studie bei der späteren Überlagerung der Dateien zu verbessern, wurden in jeder Datei etwaige Ausreißerpunkte entfernt. Dieses Vorgehen wurde nun mit allen Prothesen mit dem Bearbeitungsstand „Drei Tage nach dem Einartikulieren“

wiederholt. Zusätzlich zu den Prothesen der Studierenden wurde zu diesem Zeitpunkt auch die von dem Zahntechnikermeister hergestellte Teilprothese in Wachs eingescannt, um die Vergleichsdaten zu generieren.

Anschließend wurden die STL-Dateien am Computer mit der Software Geomagic Qualify 2012<sup>®</sup> überlagert und vermessen.

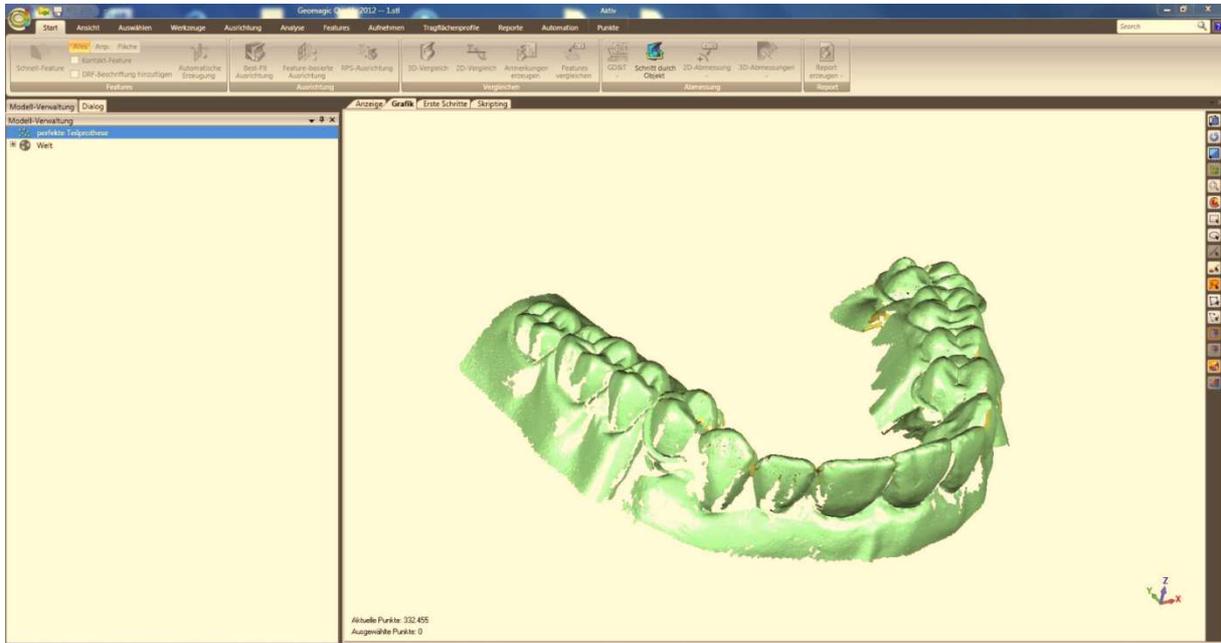


Abb. 15: Einfügen der Referenzteilprothese in der Software Geomagic Qualify 2012<sup>®</sup>

Hierzu wurde in der Software Geomagic Qualify 2012<sup>®</sup> zuerst die STL-Datei der Referenzteilprothese in Wachs über den Pfad „Datei/importieren/Referenzprothese/perfekteTeilprotheseWachs.stl“ importiert. Zusätzlich wurde die jeweilige Prothese der Studierenden für das Matching über den Pfad „Datei/importieren/3Tagenacheinartikulieren/Teilprothesex.stl“ ausgewählt.

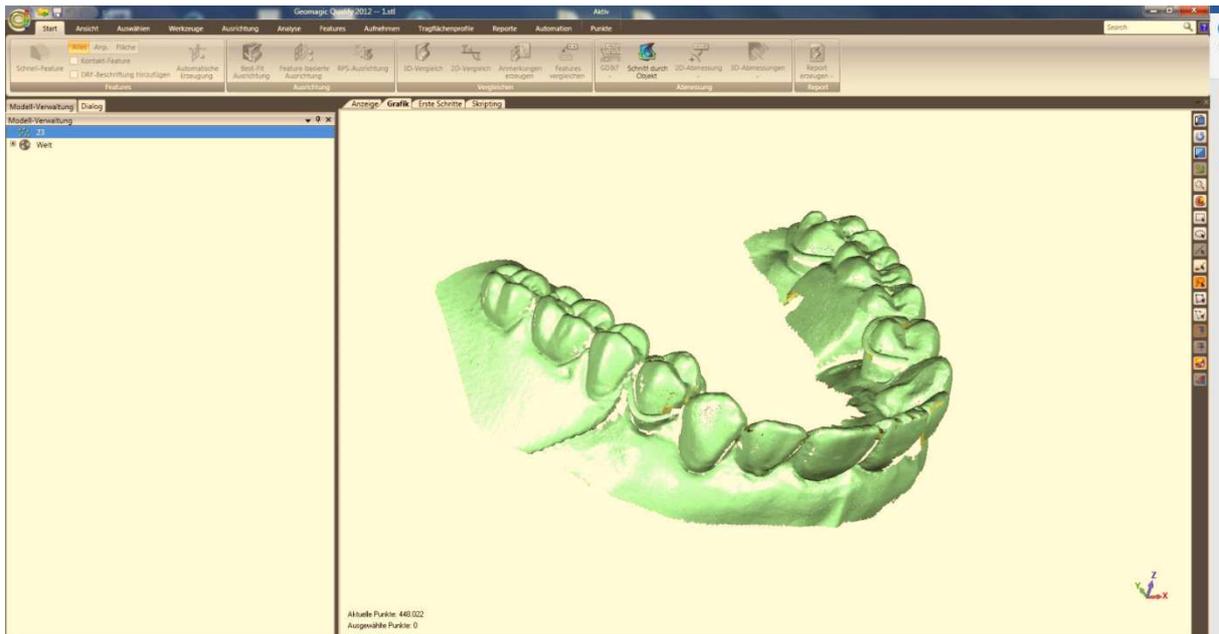


Abb. 16: Einfügen der Referenzteilprothese in der Software Geomagic Quality 2012®

Nach dem Einfügen der zwei abzugleichenden Prothesen wurden die Strukturen überlagert. Dafür wurde die Referenzteilprothese als transluzente Orientierungsstruktur abgebildet. Als Referenzpunkte dienten die Gipszähne. Nach der Überlagerung wurden sowohl die negativen als auch die positiven Abweichungen farblich dargestellt (Abb. 17).

Das Ergebnis dieser Überlagerung war eine farblich codierte Auswertung in Form einer PDF-Datei, anhand deren zu erkennen war, wie weit die eigene Prothese von der Referenzteilprothese abwich.

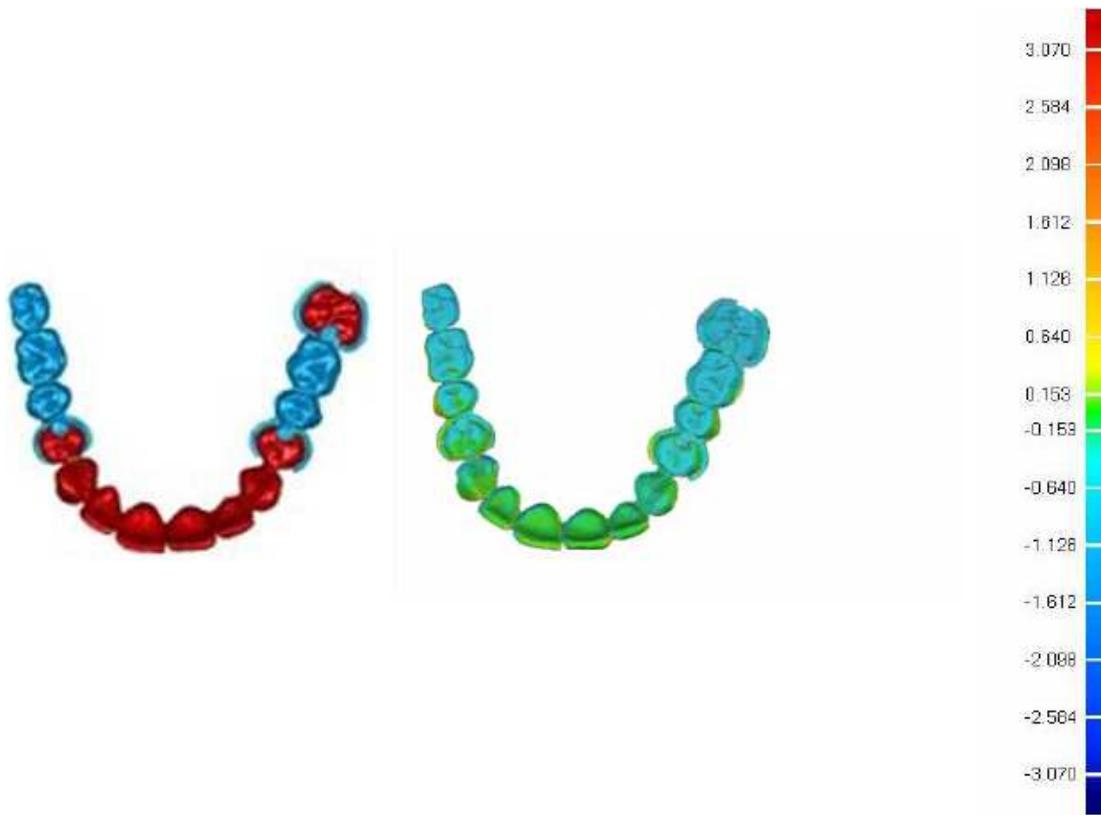


Abb. 17: Gipsmodell mit Referenzpunkten und fertig überlagerte Prothese

### Rückgabe der eingescannten Modelle an die Studierenden

Nachdem das Gipsmodell samt der Prothese digitalisiert worden war, erhielten alle Studierenden ihre Arbeiten zurück. Die Studierenden aus der Digitales-Feedback-Gruppe erhielten zu diesem Zeitpunkt zusätzlich die erstellten PDF-Dokumente mit der Farbabweichung. Diese Farbcodierung wurde mit ihnen einmal durchgesprochen. Somit konnten die Studierenden anhand der jeweiligen Farbabweichung genau erkennen, wie sie die jeweiligen Zähne umstellen mussten. Die Studierenden aus der Referenzgruppe erhielten diese farbliche Auswertung nicht und arbeiteten nur mit den traditionellen Bewertungen und Arbeitsanweisungen der wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität, sowohl in mündlicher als auch in praktischer Form.

Nach der Abnahme der vollständigen Zahnaufstellung durch die wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität und nach dem Erhalt des Testats „Aufstellung der zu ersetzenden Seitenzähne“ folgte als nächster Schritt das Ausmodellieren der Prothese in Wachs. Hierzu wurde an den Stellen, an denen sich später die Kunststoffbasis der Teilprothese befinden sollte, rosa Plattenwachs

aufgetragen. Als Schichtstärke wurden zwei Platten übereinander verwendet, was einer Schichtstärke von ca. 3 mm entsprach. Nach dem Auftragen dieser Platten konnten die Studierenden ihre Prothese mit Wachsmessern und verschiedenen zahntechnischen Aufwachsinstrumenten ausarbeiten.

Daraufhin erhielten sie das Testat für das Ausmodellieren in Wachs und konnten sich dem nächsten Arbeitsschritt, dem Einbetten der Prothese, widmen. Dafür mussten sie zunächst die Gipszähne des Modells mit Silikon ausblocken, um sie beim Ein- und Ausbetten nicht zu beschädigen. Anschließend folgte die erste Gipsschicht in der Küvette mit Hartgips vom Typ III (HS-Hartgips® blau, Henry Schein). Beim Einbetten des Gipsmodells war darauf zu achten, dass der spätere Injektionskanal am Tuberculum maxillae angelegt werden konnte. Nach dem Aushärten der ersten Gipsschicht mussten die Wachskanäle (PalaXpress Kanalwachs®, Kulzer GmbH) zum späteren Injizieren angebracht werden.

Dies waren einmal der Injektionskanal mit Kanalwachs von 0,7 cm Durchmesser und einmal der Entlüftungskanal mit Kanalwachs von 0,3 cm Durchmesser. Der Entlüftungskanal sollte so angelegt werden, dass der kürzeste Weg vom Trigonum maxillae zum Entlüftungskanal der Küvette erreicht werden konnte. Anschließend konnte die Küvette mit einer zweiten und dritten Schicht Gips aufgefüllt werden, zwischen denen jeweils mit einem Isoliermittel Gips gegen Gips isoliert werden musste. Nach dem vollständigen Einbetten der Prothese wurde das Wachs 5 min lang im Ausbrühofen bei ca. 90 °C ausgebrüht.

Bei noch vorhandenen Restwachsrückständen in der Küvette wurden diese mit heißem Wasser aus der Handdusche entfernt, sodass in der Küvette nur noch Gips und die Kunststoffzähne vorhanden waren. Danach mussten die Studierenden mit einem Diamantfräser die Basalflächen der Kunststoffzähne anrauen, um den Verbund des Kunststoffs der Prothesenbasis mit den Kunststoffzähnen zu verbessern. Zähne, die am Gips keinen festen Halt mehr hatten, mussten mit einer kleinen Menge Sekundenkleber befestigt werden, damit sie beim Injizieren an Ort und Stelle bleiben.

### **4.2.7 INJIZIEREN**

Vor dem Injizieren mussten alle Gipsflächen zweimal dünn mit Aislar® (Kulzer GmbH) isoliert werden, um ein Anhaften des Kunststoffs am Gips zu vermeiden. Auf die Kunststoffzähne wurde mit einem Pinsel ohne Metalleinfassung zweimal Palabond® (Kulzer GmbH) als Haftvermittler aufgetragen. Die Einwirkzeit betrug jeweils 30 s.

Anschließend musste der Prothesenkunststoff innerhalb von 10 min in die Küvette eingebracht werden, weil danach der Haftvermittler seine Wirkung verliert. Hierzu mussten nun die Küvettenhälften wieder aufeinandergesetzt und mit dem Schlüssel fest angezogen werden.

Danach wurde sie zwischen die Zentrierscheiben des Injektionsgerätes (Palajet®-Druckluft-Injektionsgerät, Kulzer GmbH) eingesetzt und der Kunststoff angemischt. Als Prothesenkunststoff wurde den Studierenden PalaXpress® (Kulzer GmbH) zur Verfügung gestellt. Nach dem Injizieren wurde die Küvette bei 55 °C und 2 bar 30 min lang in einen Drucktopf gelegt. Anschließend wurde die Küvette ca. 30 min lang in einem Eimer mit lauwarmem Wasser abgekühlt. Danach konnte die Prothese ausgebettet, reokkludiert und eingeschliffen werden. Hierfür gab es die Testschritte „Teilprothese injiziert und ausgebettet“ sowie „Teilprothese reokkludiert“ bzw. „Frühkontakte eingeschliffen“.

### **4.2.8 AUSARBEITUNG UND POLITUR**

Nach dem Erhalt der Testate wurde die Prothese vom Gipsmodell abgenommen und mit kreuzverzahnten Kunststofffräsen sowie mit Papier in abnehmender Körnung geglättet. Danach erfolgte die Politur zunächst mit Bimsstein bei 1500 U/min und dann mit einem Prothesenpoliturmittel bei 3000 U/min. Nach der Ausarbeitung und der Politur der Prothese wurde diese auf dem zweiten Gipsmodell eingepasst und die Statik eingeschliffen, sodass keine dynamischen Kontakte mehr vorhanden waren.

### **4.2.9 ZWEITER SCAN**

Nach der Fertigstellung der Teilprothesen wurden die Prothesen analog dem ersten Scanvorgang ein zweites Mal digitalisiert. Dieser neue Datensatz der fertigen Teilprothese aus Kunststoff wurde dann mit dem Datensatz der fertigen Referenzkunststoffteilprothese überlagert und anschließend ausgewertet.

#### 4.2.10 FERTIGUNGSSCHRITTE DER TEILPROTHESE

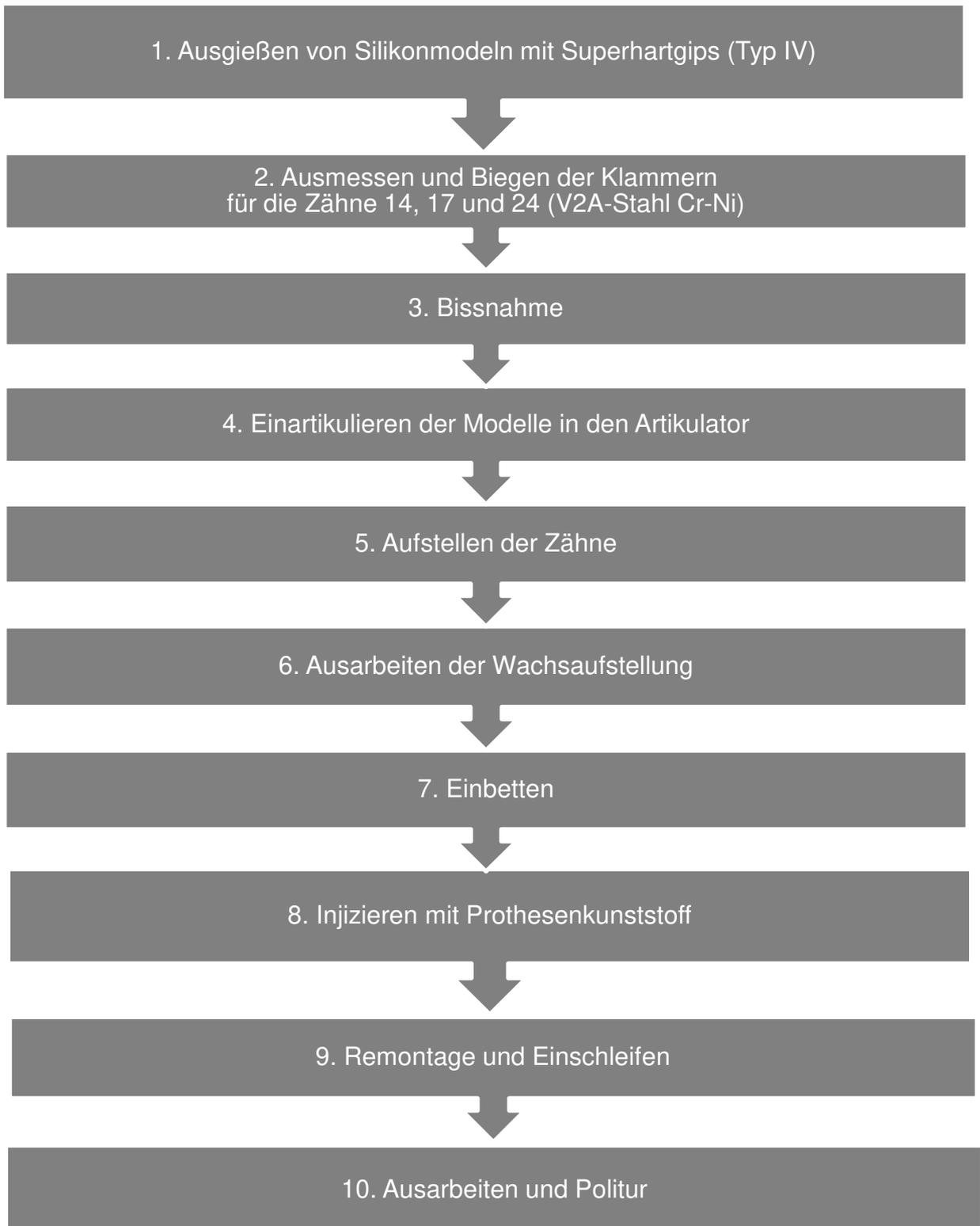
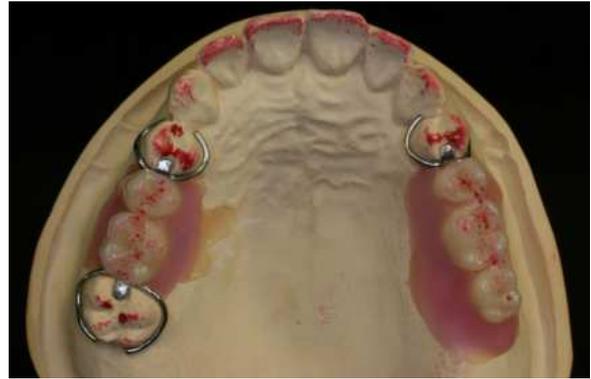


Abb. 18: Einzelne Fertigungsschritte der Teilprothese im technisch-propädeutischen Kurs an der Ludwig-Maximilians-Universität





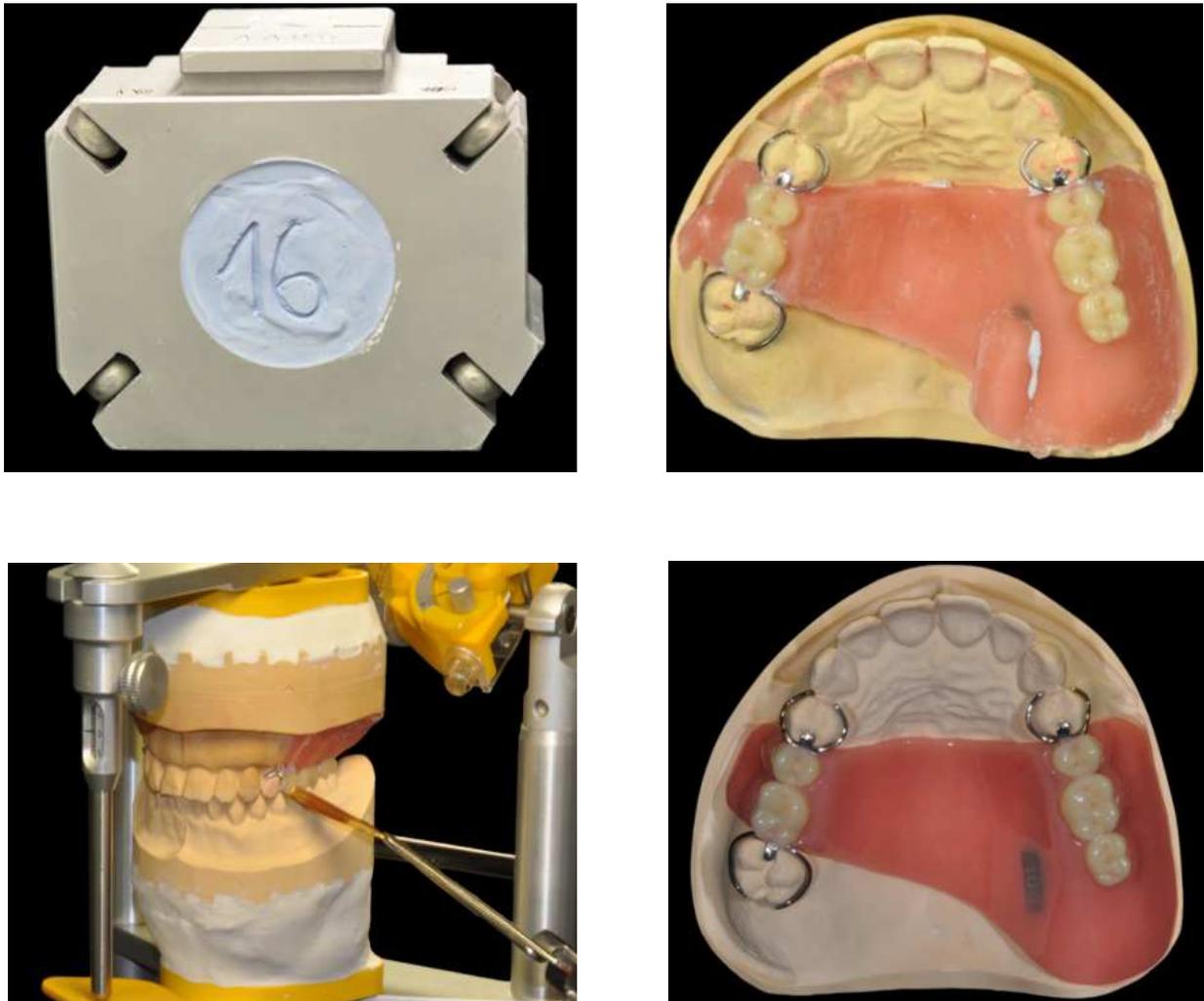


Abb. 19: Einzelne Fertigungsschritte der Teilprothese im technisch-propädeutischen Kurs an der Ludwig-Maximilians-Universität

#### 4.2.11 AUSWERTUNG DER ABWEICHUNGEN

In dieser Studie wurden bei der Auswertung der Abweichungen der Referenz- von der Untersuchungsteilprothese ausschließlich die Positionen der Zähne betrachtet. Weitere Parameter wie beispielsweise die Rauigkeit der Modelloberfläche oder die Sattelsextension wurden nicht in die Berechnung miteinbezogen. Für die Analyse wurden alle hergestellten Teilprothesen eingescannt und die aufgestellten Zähne digital mit einem optimalen Referenzmodell, der Referenzteilprothese, verglichen. Dieser Vergleich wurde im Best-Fit-Verfahren mit der Software Geomagic (Geomagic Quality 2012®.1.2, Geomagic GmbH, Leipzig) vorgenommen, die hierfür einen Iterative-next-Point-Algorithmus verwendet.

Die beiden Objekte wurden dazu grob aufeinander ausgerichtet und über drei Anordnungspunkte auf dem Testobjekt mit den nächstliegenden Punkten auf dem

Referenzmodell überlagert. Zusätzlich zu der digitalen Auswertung wurden die Teilprothesen auf dem traditionellen Weg durch die Angestellten der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität verblindet bewertet. Dieses Team erhielt keine Auskunft über die Ergebnisse der digitalen Auswertung oder darüber, ob ein Studierender zur Digitales-Feedback-Gruppe oder zur Referenzgruppe gehörte. Eine Übersicht über die Durchführung dieser Studie und die anschließende Analyse ist in Abb. 20 dargestellt.

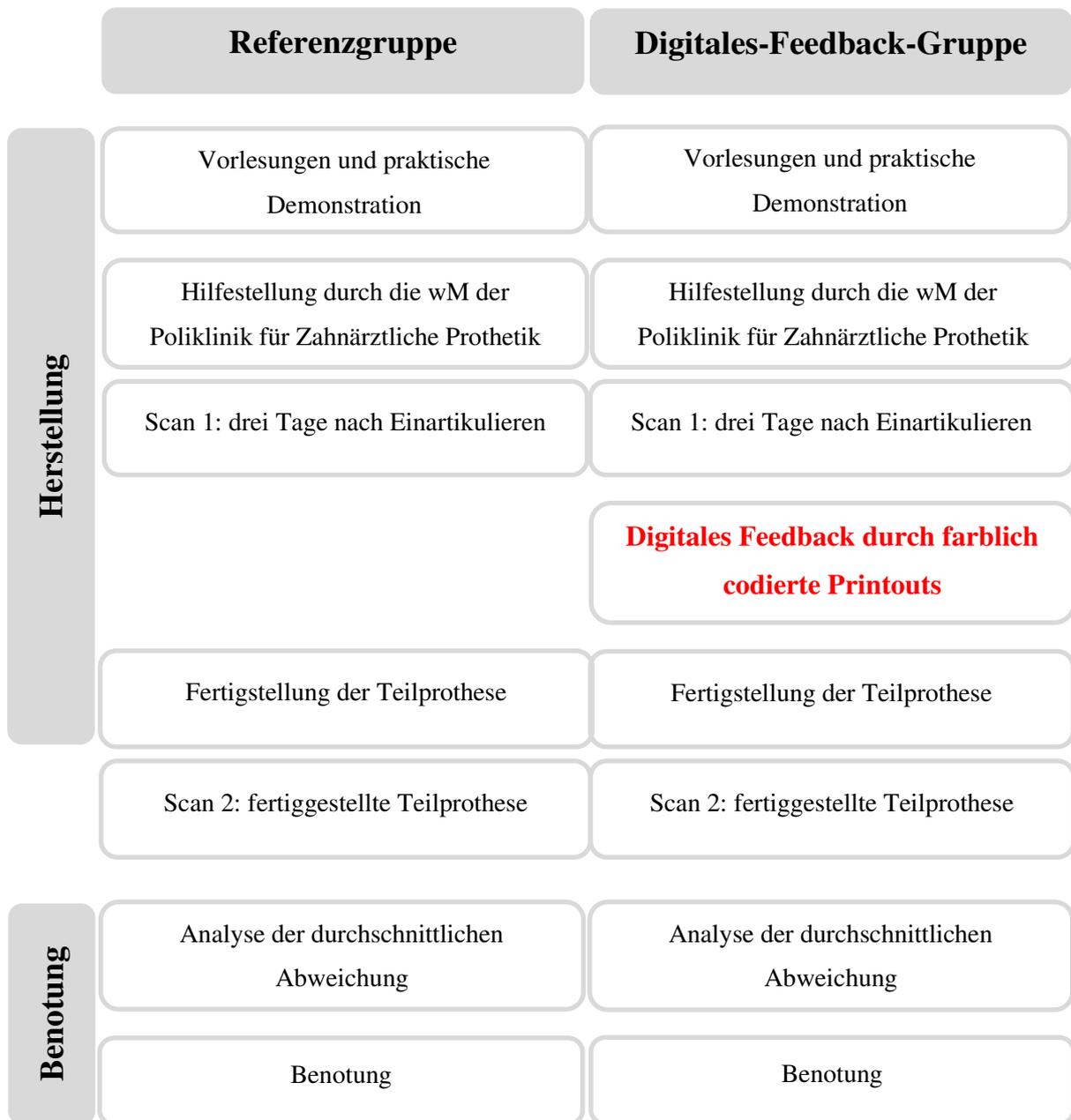


Abb. 20: Ablauf der Studie

#### **4.2.12 TRADITIONELLE AUSWERTUNG**

Die traditionelle Auswertung durch die wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität umfasst verschiedene Teilnoten. Die Gesamtnote setzt sich aus den Einzelnoten Aufstellung, Okklusion, Politur und Klammer zusammen.

#### **4.2.13 DIGITALE AUSWERTUNG**

Um eine digitale Auswertung erstellen zu können, wurden die einzelnen Arbeiten zweimal eingescannt, zunächst drei Tage nach dem Beginn der Zahnaufstellung und ein zweites Mal nach der Fertigstellung der Teilprothese. Die Referenzteilprothese wurde ebenfalls zweimal eingescannt; der erste Scan erfolgte in Wachs und der zweite, als die Teilprothese in Kunststoff fertiggestellt war. Die Teilnehmer aus der Digitales-Feedback-Gruppe erhielten drei Tage nach dem Beginn der Aufstellung eine Rückmeldung in Form eines PDFs mit der entsprechenden Farbabweichung ihrer aufgestellten Zähne. Anhand dieses PDFs konnten die Studierenden ihre Arbeit kontrollieren und gegebenenfalls Fehler korrigieren.

Die Messdaten (STL-Datensätze) wurden drei Tage nach dem Einartikulieren durch das Überlagern der Wachsteilprothese der Studierenden mit der Referenzteilprothese in Wachs und durch das Überlagern der fertigen Kunststoffteilprothese der Studierenden mit der Referenzteilprothese in Kunststoff erzeugt. Von der Software Geomagic wurde der Wert der durchschnittlichen Abweichung als Vergleichswert verwendet. Die Berechnung dieses Wertes entspricht dem arithmetischen Mittel der Abweichungen der Zahnaufstellung.

#### **4.2.14 STATISTISCHE DATENAUSWERTUNG**

Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS für Windows (SPSS, Version 23.0, IBM, Armonk, New York). Im Rahmen der beschreibenden Statistik wurden die Maximal-, die Minimal-, die Median- und die Interquartilwerte ermittelt.

Zur Ermittlung der Abweichungen der Teilprothesen mussten zwei unterschiedliche statistische Tests angewandt werden. Um zu prüfen, ob es sich bei dieser Auswertung um eine Normalverteilung handelt, wurde ein Kolmogorow-Smirnow-Test durchgeführt [49]. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0,05$  festgelegt. Aufgrund dessen, dass es sich hierbei nicht um eine Normalverteilung handelte, wurde zusätzlich ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt [50], um die Signifikanz zu bestätigen. Der Mann-

Whitney-U-Test ist ein parameterfreier statistischer Test, der zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung zwischen zwei Verteilungen (zwei Prothesen) geeignet ist. Das Signifikanzniveau wurde wiederum auf  $p < 0,05$  festgelegt.

### 5. ERGEBNISSE

Die deskriptive Statistik über die Genauigkeit der Zahnaufstellung nach dem ersten und zweiten Scan ist in Abb. 21 dargestellt. Der Umfang aller Messungen N ergab sich aus den teilnehmenden Studenten in der Digitalen-Feedback-Gruppe (N=61) und der Referenzgruppe ohne digitales Feedback (N=71).

In der Digitalen-Feedback-Gruppe zeigte sich ein Medianwert des durchschnittlichen Fehlers aller teilnehmenden Studenten dieser Gruppe von 4,479 mm (Scan 1) nach dem ersten Scan. Der Medianwert des durchschnittlichen Fehlers nach der Fertigstellung der Prothese und dem darauffolgenden zweiten Scan (Scan 2) lag bei 3,986 mm. Es zeigte sich eine deutliche Reduzierung des Fehlers.

Bei der Referenzgruppe hingegen wies der Medianwert des durchschnittlichen Fehlers beim Abscannen der Aufstellung nach 3 Tagen (Scan 1) einen Wert von 4,285 mm auf. Er war also fast auf gleicher Höhe wie der erste Wert der Digitalen-Feedback-Gruppe. Allerdings zeigte sich beim zweiten Scan nach Fertigstellung der Prothese der Referenzgruppe keine Reduzierung dieses Wertes. Er lag mit 4,273 mm nahezu identisch auf Höhe des ersten Scans.

Der Interquartilsabstand lag in der Digitalen-Feedback-Gruppe zum Zeitpunkt „Scan 1“ bei 0,601 mm und zum Zeitpunkt „Scan 2“ bei 0,210 mm. In der Referenzgruppe lag der Interquartilsabstand zum Zeitpunkt „Scan 1“ bei 0,426 mm und zum Zeitpunkt „Scan 2“ bei 0,195 mm. Des Weiteren ergab sich an der Messbasis des Wertes der durchschnittlichen Abweichung kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,345$ ) zwischen den beiden Gruppen. Als Messbasis diente Scan 1. Der Wert der durchschnittlichen Abweichung der fertigen Teilprothesen war hingegen signifikant unterschiedlich ( $p \leq 0,001$ ).

Zusammenfassend ergab der Medianwert des durchschnittlichen Fehlers in der Referenzgruppe sowohl drei Tage nach dem Beginn der Aufstellung als auch nach der Fertigstellung der Teilprothese einen identischen Wert ( $p = 1,000$ ), wohingegen der Medianwert in der Digitalen-Feedback-Gruppe signifikant unterschiedlich war ( $p \leq 0,001$ ) (Abb.21).

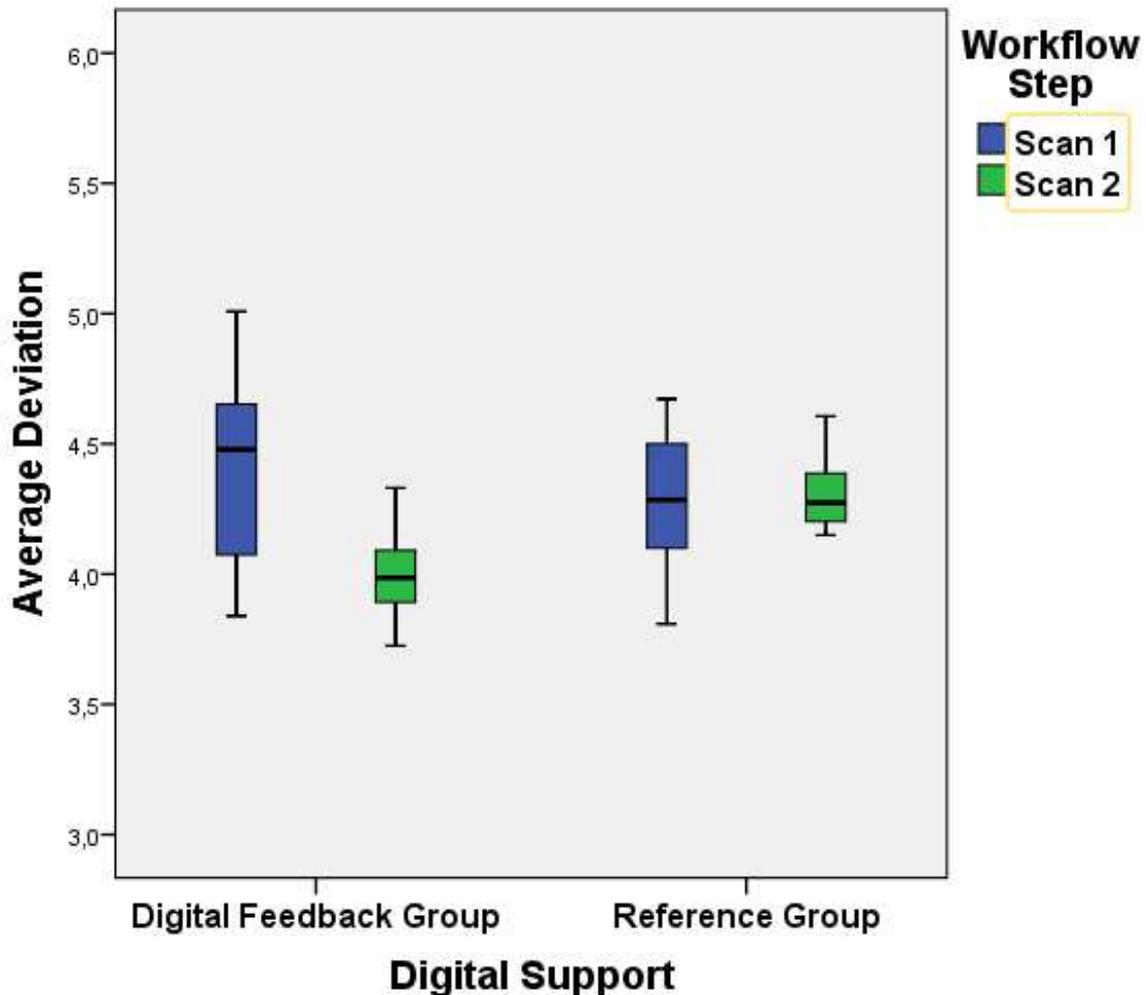


Abb. 21: Medianwerte des durchschnittlichen Fehlers (Average Deviation)

Die zweite Messung neben den durchschnittlichen Fehler war die Notenvergabe der wM in den beiden Gruppen. Der Medianwert lag in beiden Gruppen bei 3,0. Jedoch zeigte sich in der Digitalen-Feedback-Gruppe, dass 50 % der Noten zwischen 2,5 und 3,0 lagen. In der Referenzgruppe lagen dagegen 50 % der Noten zwischen 3,0 und 3,5. Dies bedeutet, dass die Mehrzahl der Studenten aus der Digitalen-Feedback-Gruppe zur besseren Note tendierte, wohingegen in der Referenzgruppe der Trend eher zur schlechten Note ging.

Die Studienergebnisse zeigen des Weiteren, dass es zwischen der Digitalen-Feedback-Gruppe und der Referenzgruppe einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,003$ ) in den durch die Dozenten gegebenen Gesamtnoten gab.

Abb. 22 fasst die Ergebnisse bei den Noten zusammen.

## Ergebnisse

---

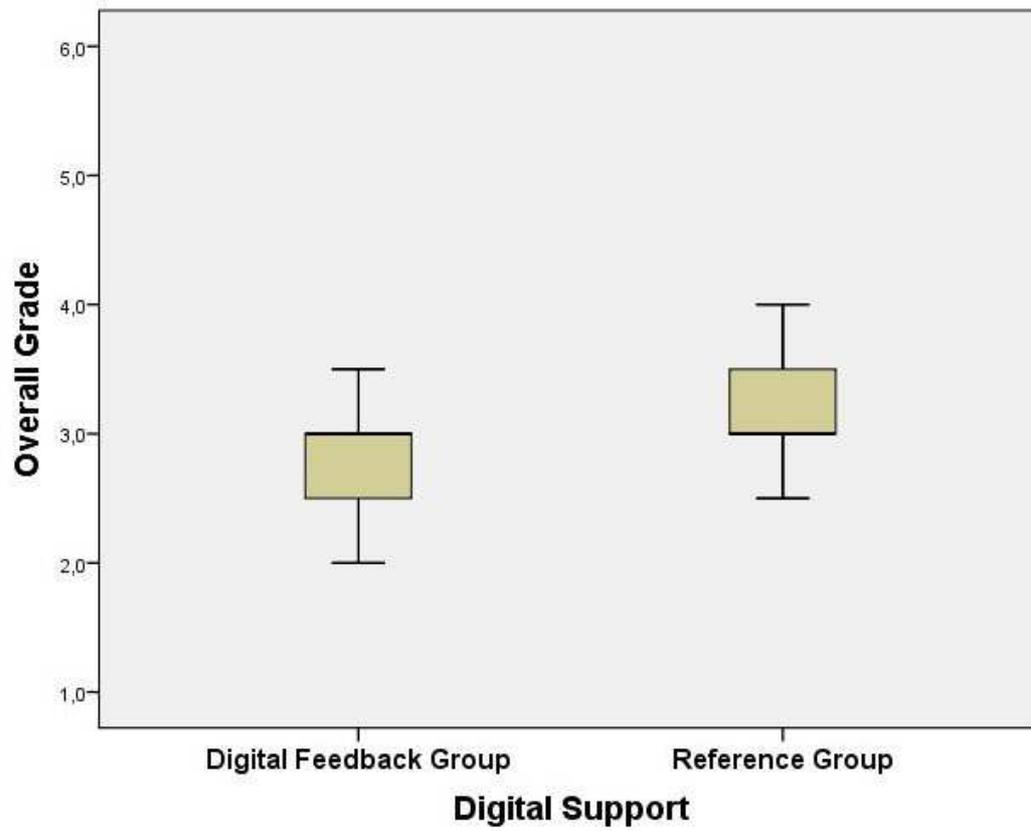


Abb. 22: Median der Gesamtnoten von Digitales-Feedback-Gruppe und Referenzgruppe

## **6. DISKUSSION**

### **6.1 STUDIENAUFBAU**

Mit der Studie im vorklinischen technisch-propädeutischen Kurs an der Ludwig-Maximilians-Universität wurde untersucht, ob die digitale Unterstützung der traditionellen Lehre am Beispiel der Fertigung einer Teilprothese zu deren Verbesserung führt.

Vor dem Beginn der Studie wurde von einem Zahntechnikermeister an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität eine Teilprothese mit denselben Vorgaben, Geräten und Materialien hergestellt, die auch den Studierenden zur Verfügung gestellt wurden. Diese Prothese diente als Referenzprothese und war somit die Grundlage für den späteren digitalen Vergleich mit den Teilprothesen, die die Studierenden anfertigten. Eine Kontrolle der aufgestellten Prothese durch einen zweiten Zahntechniker oder den Kursleiter erfolgte jedoch nicht. Dies hätte dazu führen können, dass ein unbewusster Fehler des Zahntechnikermeisters sich in der Masterprothese manifestiert hätte und zu Abweichungen bei der idealen Zahnaufstellung geführt hätte. Diese Abweichung wäre natürlich von den Studierenden in der digitalen Feedback Gruppe wahrscheinlich unbemerkt übernommen worden, da sie sich sehr stark auf das digitale Feedback verlassen hätten. Hier wäre eine Überprüfung vor dem Einscannen der Masterprothese durch ein zweites Augenpaar eventuell hilfreich, um dieses Risiko zu minimieren.

Im Wintersemester 2012/2013 und Sommersemester 2013 fanden sich insgesamt 132 Studierende, wovon 117 Studierende bis zum Ende an der Studie teilnahmen. Die Studierenden absolvierten zum Zeitpunkt der Studiendurchführung den technisch-propädeutischen Kurs an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität. Beide Semester wurden nach der traditionellen Lehre mit Hilfestellung sowohl durch Zahntechniker und wM als auch durch Vorlesungen und praktische Demonstrationen unterrichtet. Zusätzlich zu dieser traditionellen Lehre erhielten 57 Studierende digitale Unterstützung. Dafür wurden die studentischen Arbeiten (Teilprothesen) eingescannt und mit der zuvor bereits digitalisierten Referenzteilprothese des Zahntechnikers digital überlagert. Eine Auswahl der Studierenden nach Wissens- und Können-Stand erfolgte nicht. Die Auswahl erfolgte rein aufgrund des Semesters. Dies könnte eventuell zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen, wenn in einer Gruppe zufällig viele Studierende mit

zahntechnischem Vorwissen kumuliert gewesen wären. Hier wäre es vielleicht sinnvoll gewesen, bei der Gruppeneinteilung eine kleine Befragung der Studierenden über Vorkenntnisse durchzuführen, um so einen Vergleich zwischen der Digitalen Feedbackgruppe und der Referenzgruppe zu haben.

Die dreidimensionale farbliche Auswertung wurde den Studierenden in Form eines PDFs als digitale Unterstützung ausgehändigt. Allerdings erhielten die Studierenden die Datei nur als Ausdruck auf Papier. Eine weitere Option wäre gewesen, dem Studenten die pdf Datei komplett als USB-Stick oder per E-Mail verfügbar zu machen, um eine größere Verfügbarkeit für die Studierenden zu erhalten. Anhand dieser Auswertung konnten die Studierenden ihre Teilprothesen analysieren und in falscher Position aufgestellte Zähne umstellen, um somit eine annähernd optimale Aufstellung anfertigen zu können. Die erste digitale Auswertung erfolgte drei Tage nach dem Beginn der Aufstellung. Eine zweite digitale Auswertung erfolgte nach der Abgabe der Arbeiten, um zu überprüfen, ob die farblich codierte Auswertung den Studierenden zu einem besseren Ergebnis verholfen hat. Das Ergebnis dieser zweiten Auswertung hat die Arbeitshypothese bestätigt, dass die digitale Unterstützung bei der Herstellung der Teilprothesen das Endergebnis der Zahnaufstellung verbessert. Diskussionswürdig ist, ob vielleicht ein dritter Scan kurz vor der Umsetzung der Prothese in Kunststoff noch hilfreich gewesen wäre und neue Erkenntnisse geliefert hätte. So hätte man z.B. sehen können, ob die Fehler bei der endgültigen Aufstellung eher beim Aufstellen der Zähne im Wachs zu finden waren oder bei der Umsetzung der Prothese in Kunststoff (d.h. Fehler beim Einbetten, falsche Temperatur, Druck) passiert sind. Dies hätte nochmal einen Mehrwert gehabt, um die genau Fehlerquelle bei den Studierenden auszumachen.

## **6.2 DISKUSSION VON MATERIAL UND METHODE**

### **6.2.1 COMPUTERUNTERSTÜTZTE LEHRE**

Als digitale Lehrmethoden kamen in dieser Studie das *Dual Coding* und das *Discrimination Training* zum Einsatz.

Durch die zusätzlichen Grafiken zur Veranschaulichung der Abweichungen bzw. der korrekt aufgestellten Zähne konnte das Verständnis für die richtige Aufstellung von Kunststoffzähnen in Zahnprothesen gefördert werden. Zudem wurde durch die multimediale Codierung der Wissenserwerb der Studierenden in der Prothetik

erleichtert. Dies zeigte sich an den signifikant besseren Ergebnissen der Auswertung der Digitalen-Feedback-Gruppe im Vergleich zur Referenzgruppe.

Eine Begrenzung der positiven Effekte des multimedialen Lernens ergibt sich aus der Zahl der Informationen, die über die beiden Kanäle (visuell/verbal) verarbeitet werden können [51]. Zudem ist die Kapazität des Arbeits- oder Kurzzeitgedächtnisses, das denjenigen Teil des Gedächtnisses darstellt, in dem das multimediale Lernen stattfindet, ebenfalls begrenzt [21, 52]. Die Informationen gelangen in das Arbeitsgedächtnis, nachdem sie vom sensorischen Gedächtnis über Augen und Ohren aufgenommen und anschließend über den verbalen und visuellen Kanal an das Arbeitsgedächtnis weitergeleitet worden sind [19]. Aus diesem Grund gelingt es den Lernenden in den seltensten Fällen, komplexe Lerneinheiten auf einmal zu verarbeiten.

Die Kapazitätsgrenzen hängen auch wesentlich vom Vorwissen der Lernenden ab. Hierbei könnte zum Tragen kommen, dass diejenigen Studierenden, die bereits eine zahntechnische oder auch zahnmedizinische Fachangestelltenausbildung absolviert hatten, die Informationen aus der Farbcodierung leichter in ihrer Arbeit umsetzen konnten als diejenigen, die keine entsprechende Vorbildung hatten. Nichtsdestotrotz erzielten auch diejenigen Studierenden, die keine entsprechende Ausbildung vorweisen konnten, sich jedoch in der Digitalen-Feedback-Gruppe befanden, bessere Ergebnisse als diejenigen aus der Referenzgruppe.

Mayer beobachtete 1988 in seiner Studie, dass Lernende, die wenig Vorwissen über die gelehrteten Inhalte mitbrachten, Texte und auch Bilder sehr lange oder wiederholt betrachteten, um alle relevanten Informationen aufzunehmen [53]. Die Studierenden erhielten durch das Aushändigen der ausgedruckten Farbcodierung die Möglichkeit, die Bilder auch nach dem Ende der Kurszeit für sich zu Hause auszuwerten. Das längere Befassen mit den Bildern ermöglichte es ihnen, die Auswertung ihrer Arbeit im Arbeitsgedächtnis vollständig zu verarbeiten und am nächsten Kurstag besser in die Praxis umzusetzen. Verständnis tritt laut Sweller erst dann ein, wenn alle wichtigen Informationen simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden konnten [54].

Anderson et al. verwiesen in ihrer Studie auch darauf, dass dieses Lernverhalten bei Menschen mit wenig oder ohne Vorwissen sehr stark ausgeprägt ist. Der Grund hierfür ist die fehlenden themenbezogenen Schemata im menschlichen Gedächtnis, die sie nicht abrufen können, um ihre Aufmerksamkeit besser auf das Lehrmaterial zu lenken.

Diese Schemata werden erst während des Lernens erstellt [55]. Sie umfassen Objekte, Handlungen, Ereignisse oder Situationen, die im Gedächtnis zusammenhängend abgebildet und durch einzelne Wissenskapitel spezifiziert werden [56]. Sie kategorisieren und organisieren Wissen und steuern den Erwerb neuen Wissens [57, 58].

Über solche Schemata können Studierende verfügen, die bereits zahnmedizinisches Vorwissen mitbringen (Zahntechniker, Zahnmedizinische Fachangestellte, Zahnmedizinische Prophylaxeassistenten oder Ähnliche). Diese Schemata steuern ihre Informationsaufnahme und lassen sie die Korrekturen schneller umsetzen. Dies stellt eine mögliche Einschränkung bei der Auswertung dieser Studie dar, weil es sich um gemischte Gruppen sowohl mit zahnmedizinisch Vorgebildeten als auch mit Studierenden ohne Vorwissen handelte. Die Möglichkeit, dass dadurch das Studienergebnis beeinflusst wurde, ist nicht auszuschließen.

Des Weiteren ist hierbei jedoch auch die individuelle Verarbeitungskapazität des menschlichen Arbeitsgedächtnisses zu beachten [21, 52, 59]. Das Langzeitgedächtnis weist eine solche Begrenzung nicht auf [54]. Nicht alle Informationen können auf einmal aufgenommen und verarbeitet werden [60], was ebenfalls für die zusätzliche Unterstützung durch den Farbausdruck spricht.

Ein weiterer Vorteil der sehr übersichtlich gestalteten Farbcodierung besteht in der niedrigen *Extraneous Cognitive Load*. Die *Extraneous Cognitive Load* beschreibt die Art und Weise der Gestaltung der Lernmaterialien, genauer gesagt, die Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch irrelevante kognitive Anstrengungen. Sie ist hoch, wenn die Lernenden viele irrelevante und wenig zielführende geistige Anstrengungen aufbringen müssen, um dem Lehrmaterial die wichtigen Informationen zu entnehmen. Wenn die Lernenden die relevanten Informationen hingegen schnell und in leicht verständlicher Form finden können, ist die *Extraneous Cognitive Load* gering.

Ein Beispiel dafür ist die Beschreibung eines Dreiecks auf zwei verschiedene Arten. Eine Beschreibung ist die verbale, eine wesentlich bessere ist die Beschreibung durch Zeigen eines Bildes von einem Dreieck. Die in dieser Studie verwendete Lehrmethode entspricht der zweiten Möglichkeit einer Beschreibung. Gezeigt wurde ein Bild von den überlagerten Prothesen mit einer übersichtlichen Darstellung der für ein konstruktiveres Weiterarbeiten relevanten Informationen. Das Ziel sollte es sein, die *Extraneous Cognitive Load* neben den anderen beiden kognitiven Belastungen im

Arbeitsgedächtnis, der *Intrinsic Cognitive Load* und der *Germane Cognitive Load*, zu minimieren.

Eine didaktische Möglichkeit, die *Extraneous Cognitive Load* zu verringern, ist der sogenannte *Worked Example Effect*, dessen zentraler Punkt ausgearbeitete Lösungsbeispiele sind, die von den Lernenden bearbeitet werden [61, 62]. In dieser Studie konnte dies anhand der an die Studierenden verteilten PDF-Dokumente mit den überlagerten Prothesen verwirklicht werden. Hier wurde den Studierenden ein Lösungsbeispiel aufgezeigt, anhand dessen sie weiterarbeiten konnten. Dabei wurde ihr Problemverständnis effektiver unterstützt als ohne die direkte digitale Überlagerung ihrer Prothesen mit der Referenzprothese.

Kritisch ist hier allerdings auch darauf hinzuweisen, dass der Vergleich der studentischen Arbeiten mit der Referenzprothese ausschließlich einmal während der Fertigung der Teilprothese vorgenommen wurde. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Punkt, der ebenfalls kritisch zu betrachten ist, ist der sogenannte *Modality Effect*. Hierbei handelt es sich um die Überlastung eines der beiden Kanäle (visuell oder verbal) durch die gleichzeitige Präsentation sehr vieler Wissensinhalte, vor allem bei wenig themenbezogenem Vorwissen [63]. Die ausgeteilten Dokumente enthielten sehr viel Wissen und sollten, um den visuellen Kanal nicht zu überlasten, von den Lehrenden erklärt werden. In dieser Studie wurde die Grafik einmal mit den Studierenden durchgesprochen.

Laut Kalyuga et al. ist auch der *Expertise Reversal Effect* in didaktischer Hinsicht nicht zu vernachlässigen. Er besagt, dass Lernende mit wenig Vorwissen in einer Wissensdomäne eine Lernunterstützung bei der Gestaltung der Lehrmaterialien benötigen [64]. Als sinnvoll hat sich hierfür neben Texten und Bildern der Einsatz von Animationen erwiesen. Mangels technischer Möglichkeiten konnten in dieser Studie die überlagerten Daten den Studierenden nicht digital übermittelt werden. Stattdessen wurde das Endergebnis der Überlagerung ausgedruckt und den Studierenden ausgeteilt. Didaktisch wäre es sinnvoller, wenn die Studierenden die Ergebnisse digital aus unterschiedlichen Blickwinkeln im 3-D-Format betrachten und gegebenenfalls vergrößern oder verkleinern könnten.

Paivios Theorie des *Dual Coding* wird auch von der Hirnforschung unterstützt, die davon ausgeht, dass in der rechten Gehirnhälfte bildliche und in der linken sprachliche Reize verarbeitet werden [65].

Auch Mayer bestätigt Paivios Theorie des *Dual Coding*: „Menschen lernen besser mit Wörtern und Bildern als nur mit einem Medium.“ [19]

Für weitere Studien in diese Richtung könnten die Gruppen erneut in Studierende mit zahnmedizinischem Vorwissen und in Studierende ohne Vorwissen aufgeteilt werden. Durch diese Aufteilung könnte der Einsatz multimedialer Lehrmethoden besser aufeinander abgestimmt und die Begrenzung des Arbeitsgedächtnisses berücksichtigt werden, um den Erwerb strukturierten und umfangreichen Wissens durch die Aufstellung von Schemata zu optimieren. Eine weitere Verbesserung könnte das mehrmalige Einscannen und Überlagern der Prothesen während der Zahnaufstellung mit sich bringen. Hierdurch könnten sich die Studierenden mehrmals ein Bild von der derzeitigen Situation ihrer Aufstellung machen und diese gegebenenfalls verbessern.

Aufgrund des zeitlich und technisch noch nicht ausgereiften Einscannens sowie zur Verfügungstellung der Ergebnisse während der Kurszeit konnten die Prothesen während der Zahnaufstellung nur einmal eingescannt werden. Dies könnte aber in Zukunft durch mehrmaliges selbstständiges Einscannen an einem Laborscanner und zusätzlicher Übermittlung, vielleicht direkt auf das Handy, vereinfacht werden. Auch im Hinblick auf die neue Approbationsordnung und der damit verbundenen Verringerung der zahntechnischen Kurse wird dies ein wichtiger anzustrebender Punkt werden. In unserer Studie standen den Studierenden zudem nur die gesetzlich vorgeschriebene Anzahl von wM im Technisch-Propädeutischen Kurs der Vorklinik zur Verfügung. Dies entspricht einer Betreuungsrelation von 1:20. Der Ablauf den die Studierenden zur Erklärung der Farbcodierung gehen mussten entsprach dem normalen Ablauf bei der Hilfestellung durch die wM im Kurs plus einer zusätzlichen studentischen Hilfskraft. Die Studierenden reichten sich hierzu in eine Reihe ein, in der sie auf den Aufruf des wM Mitarbeiters warteten und dann Hilfestellung bekamen. Zusätzliche war während der Zahnaufstellung eine studentische Hilfskraft anwesend die auch bei Fragen zur Farbkodierung Hilfe leistete. Hier wäre es von Vorteil gewesen, wenn zur Erklärung der Farbcodierung mehrere wM bereitstünden, um die Studierenden nicht zu überlasten und um das gute Gelingen der Zahnaufstellung nicht zu gefährden. Wie bereits erwähnt, könnte die digitale Auswertung auf Tablets oder auch auf die Handys der Studierenden geladen werden. Diese könnten die Grafiken dann von allen Seiten als Animationen betrachten. Auch das Vergrößern oder Verkleinern der Bilder wären dann möglich.

## 6.2.2 ALTERNATIVE DARSTELLUNG DES DIGITALEN SCAN

Die Studierenden in der digitalen Feedback Gruppe erhielten die digitale Hilfe in Form eines ausgedruckten PDF mit den unterschiedlich farblich markierten Abweichungen ihrer Prothese zur Masterprothese. Natürlich hat diese Form des zwei-dimensionalen Feedbacks auch Nachteile. Hier könnten Alternativen für noch mehr Hilfe für den Studierenden sorgen.

Als erste Alternative bieten sich haptische Modelle für den Studenten an. Diese Modelle könnten die Informationen über die falsch aufgestellten Zähne enthalten. Bei dem heutigen, digitalen Voranschreiten der Zahnmedizin gehört ein 3D- Drucker inzwischen zum festen Bestandteil eines Zahntechnischen Labors sowie vieler Praxen. Dies ermöglicht es, in kurzer Zeit gemachte Modelle aus dem Modell des Studierenden sowie der Masterprothese zu erstellen. Eine weitere Möglichkeit wäre, dem Studierenden Unterschiede im Scan der beiden Aufstellungen als Biss oder in ähnlicher Form wie Einschleif-Käppchen beim Zahntechniker im 3D-Druck herzustellen. Hier könnte der Student den Biss auf seine Aufstellung legen und Abweichungen sofort erkennen. All dies führt zu einer Verbesserung der Darstellung für den Studierenden und ist einem zwei-dimensionalen Ausdruck definitiv überlegen.

Eine mögliche, weitere Alternative wäre es, den Studierenden das Programm mit den gescannten Prothesen sowie die Auswertung darauf zugänglich zu machen. Möglich wären hier ein fester PC oder Laptop im Bereich des Kurses oder aber eine reduzierte Form des Programmes, ähnlich wie bei DVT-Viewern, für zu Hause. In beiden Fällen könnte der Student aus verschiedenen Blickwinkeln, die Unterschiede herausarbeiten und auch schneller beseitigen.

Ein noch etwas in weiterer Zukunft gelegenes Thema ist die Virtual Reality. Virtuelle Headsets wie z.B. die Oculus Rift oder andere haben inzwischen den Markt für Virtual Reality aus einer Nische in Massentauglichkeit gebracht. Auch die Anschaffungskosten solcher Brillen sind in den Jahren erheblich gefallen. So eine Darstellung des Scan-Ergebnisses ist für den Studierenden natürlich ein großer Mehrwert, da er frei im Raum seine eingescannte Aufstellung bewegen kann und sich aus jedem Blickwinkel, ohne Ablenkung von außen, mit seiner Arbeit beschäftigen kann. Allerdings sind die Anschaffungskosten immer noch nicht zu vernachlässigen. Headsets mit guter Darstellbarkeit sind in einem Bereich von ca. 1000 € zu haben. Auch entsprechende Programme für die Darstellung drei-dimensionaler Modelle sind

bereits vorhanden, müssten allerdings auf diese spezielle Einsatzmöglichkeit eingestellt bzw. umprogrammiert werden.

## **6.2.2 HERSTELLUNG DER TEILPROTHESE**

Zur Herstellung der Teilprothese wurden zunächst Doublierformen angefertigt. Um hierbei Ungenauigkeiten und Fehler zu vermeiden, wurden die Doublierformen der Teilprothese vor dem Beginn der Studie hergestellt und den Studierenden zur Verfügung gestellt.

Obgleich für die Herstellung der Doublierform qualitativ hochwertiges Silikon verwendet wurde, ist nicht vollständig zu gewährleisten, dass sich die Doublierform nach mehrmaligem Entformen wieder vollständig in ihren Ausgangszustand zurückstellt. Um dennoch ein möglichst exaktes Ergebnis zu erhalten, mussten die Studierenden die Vorgaben des Herstellers zum Gebrauch genau einhalten.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle bei der Herstellung der Modelle war das Gipsmischungsverhältnis, bei dem die Möglichkeit bestand, dass sich die Studierenden nicht genau an die Herstellerangaben halten. Zudem war der zahntechnische Kenntnisstand der noch in Ausbildung befindlichen Studierenden zu berücksichtigen.

Die Studierenden teilten sich zu zweit eine Doublierform für den Oberkiefer und eine für den Unterkiefer, sodass die Formen jeweils nicht zu häufig ausgegossen wurden und somit eine weitere Dimensionstreue und somit dieselben Ausgangssituationen zugesichert werden konnten. Zudem musste eine Rückstellzeit von einer Stunde zwischen dem Entformen eines Gipsmodells und dem erneuten Ausgießen eingehalten werden.

Trotz all dieser Maßnahmen kann es zu Unterschieden bei den Modellen kommen. Für weitere Studien, deren Auswertung sich rein auf die Prothese/die Zähne bezieht, könnten die Gipsmodelle zusätzlich zu den Doubliermodellen vor dem Studienbeginn angefertigt und den Teilnehmern ausgehändigt werden. Somit bestünde eine weitere Möglichkeit, eine möglichst homogene Ausgangsbasis zu schaffen, um technische Fehler bei der Herstellung des Gipsmodells ausschließen zu können.

Durch die Beschränkung der Studie auf die Aufstellung der Zähne waren bei der Herstellung der Klammern keine Fehlerquellen hinsichtlich der Studienergebnisse festzustellen.

Zur Montage der Modelle standen den Studierenden als Artikulatoren, Artex® (Amann Girschbach GmbH, Pforzheim) Artikulatoren sowie der ARCON-Artikulator SAM 2PX® zur Verfügung. Durch die vielen Einstellmöglichkeiten bei diesen Artikulatoren kann es unter Umständen zu Fehlern und somit zu Unterschieden im Einartikulieren bei den einzelnen Studierenden kommen. Um dies auszuschließen, mussten sich die Studierenden nach den einzelnen Teilschritten bei den wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik Ludwig-Maximilians-Universität das Testat für den jeweiligen Schritt abholen.

Nach der richtigen Einstellung des Artikulators erfolgte die Einartikulierung des Oberkiefers mit vorgefertigten Einartikulierungshilfen, um etwaige Fehler hierbei zu vermeiden. Als Test wurde eine Splitcast-Probe durchgeführt. Um den Unterkiefer zum Oberkiefer zu montieren, fertigten die Studierenden Bisschablonen an und passten diese an den Phantomkopf an. Dieser Schritt wurde von den wM direkt am Phantomkopf überprüft; die Studierenden durften ihre Arbeit an der Teilprothese erst fortsetzen, nachdem ihnen dieses Testat unterschrieben worden war.

Auch nach der Einartikulierung des Unterkiefermodells wurde eine Splitcast-Probe durchgeführt und ein Shimstock-Protokoll zur Kontrolle angefertigt. Das Shimstock-Protokoll wurde überprüft und sollte mindestens an den Zähnen 14, 17 und 24 Kontakt aufweisen. Dies musste zur regelmäßigen Kontrolle auf dem Modell angezeichnet werden.

Nachdem die Modelle einartikuliert waren erfolgte die Zahnaufstellung. Bevorzugt sollte bei einer größeren prothetischen Versorgung die Front-Eckzahnführung angestrebt werden [29, 66]. Hierbei mussten die Studierenden beachten, dass bei einer einsetzenden Inzisalführung die Seitenzähne keinen Kontakt zu ihren Antagonisten mehr aufwiesen. Ist dies nicht der Fall kann es durch Zahnfehlstellungen zu Dysgnathien also einem Fehlbiss führen [67, 68]. Ziel dieser Führung ist der Schutz der Seitenzähne vor Überbelastungen [69]. Des Weiteren muss bei diesem Okklusionskonzept beachtet werden, dass bei Lateralbewegungen nur die Eckzähne der Arbeitsseite führen. Wenn es sich um eine latero-protrusive Bewegung handelt, also noch eine Vorwärtsbewegung gleichzeitig hinzukommt, führen zusätzlich die Inzisiven der jeweiligen Seite mit. In der reinen Vorwärtsbewegung haben die unteren vier Inzisiven mindestens Kontakt zu den oberen mittleren Inzisiven. Auch auf die Kontaktspur ist hierbei zu achten. Diese sollte stets linienförmig sein und darf nicht

unterbrochen sein [29]. Werden diese Punkte bei der Zahnaufstellung nicht beachtet, kann es zu Vorkontakten im Seitenzahnbereich kommen welche sich über Knirschbewegungen auch schädigend auf die Frontzähne auswirken [70].

Fehler bei der Zahnaufstellung wurden zur Auswertung der Studie herangezogen.

### **6.2.3 SCANVORGANG**

Zu Beginn der Studie wurden die Einstellungen des Scanners durch Einscannen zusätzlicher Modelle überprüft, um Kalibrierungsfehler auszuschließen.

Die Studierenden mussten vor der Abgabe der Modelle zum Scannen die Okklusalfächen der Zähne gründlich von Wachsresten versäubern, um Ungenauigkeiten beim anschließenden Scannen zu vermeiden. Die Oberfläche der Zähne wurde direkt vor dem Einscannen erneut auf etwaige Wachsreste überprüft. Anschließend wurden die Modelle mit einer dünnen Schicht Titandioxidspray eingesprüht [71, 72]. Hierbei wurde sehr darauf geachtet, dass das Spray möglichst gleichmäßig auf die zu scannenden Bereiche aufgesprüht wurde.

Trotz des möglichst genauen Einsprühens kann es aufgrund der manuellen Ausführung zu Ungenauigkeiten kommen. Infolgedessen kann der Lichtstrahl beim Scanvorgang in einzelnen Bereichen reflektiert werden und fehlerhafte Werte liefern. Allein durch das Auftragen von Titandioxid kommt es bei der Digitalisierung zu einem Messfehler, der bei 20–40 µm liegt [73]. Prinzipiell erreicht dieser Scanner eine Messgenauigkeit von < 20 µm und weist somit einen sehr guten Wert auf [47]. Zudem werden unter sich gehende Stellen 1 : 1 dadurch erfasst, da die Vorrichtung, auf der sich das Modell befindet, sich während des Scans dreht und kippt [74].

### **6.2.4 MATCHING**

Das mathematische Verfahren beim Matchingvorgang basiert auf einem Best-Fit-Algorithmus. Hierbei wird die Punktwolke der einen Datei mit der Punktwolke einer zweiten Datei überlagert. In dieser Studie wurden dazu STL-Dateien verwendet.

Um die Qualität der Punktwolken und somit der Messdaten zu verbessern, wurden etwaige Ausreißerpunkte bereits vor der Überlagerung mit der Referenzteilprothese manuell entfernt. Mögliche Fehlerquellen beim Matching können beispielsweise entstehen, wenn es bei der Überlagerung zu einer räumlichen Abweichung kommt [75]. Matchingtechnologien sind immer mit einem zusätzlichen Fehler behaftet [76].

### **6.2.5 INJIZIEREN**

Als Herstellungssystem für die Teilprothesen wurde das Injektionsverfahren Palajet® mit dem Kaltpolymerisat PalaXpress® gewählt. Dieses Verfahren verfügt bei korrekter Verarbeitung über die höchste Genauigkeit in der Umsetzung der Okklusionsverhältnisse bei der Überführung der Wachs- in die Kunststoffprothese im Vergleich zum Stopfpress-Verfahren oder zum Gießverfahren [77]. Die durchschnittliche Abweichung beträgt laut einer Studie der Friedrich-Schiller-Universität Jena 0,086 mm [78].

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist die Polymerisationsschrumpfung, die trotz neuester Forschungen und Entwicklungen weiterhin besteht. Peters et al. kamen in einer In-vitro-Studie zu den Einflussfaktoren für das Dimensionsverhalten von Prothesenbasiskunststoffen bei der Polymerisation zu dem Schluss, dass kalt polymerisierende Prothesenbasiskunststoffe wie PalaXpress® den kleinsten dorsalen Randspalt und somit das beste Ergebnis lieferten. Der durchschnittliche Randspalt bei den kalt polymerisierenden Prothesenkunststoffen lag bei  $196 \mu\text{m} \pm 46 \mu\text{m}$  bis  $256 \mu\text{m} \pm 83 \mu\text{m}$ . Bei den Heißpolymerisaten lagen die Werte bei  $317 \mu\text{m} \pm 57 \mu\text{m}$  bis  $369 \mu\text{m} \pm 88 \mu\text{m}$  [79].

Trotz Studien zum Injektionsverfahren mit guten Ergebnissen dieses Verfahrens liegt hierin eine erhebliche potenzielle Fehlerquelle für diese Auswertung. Dies ist vor allem der mangelnden Erfahrung der Studierenden mit dem Injektionsverfahren geschuldet, die sich negativ auf die Umsetzung auswirken kann. Zur Verringerung dieser Fehlerquelle konnten sich die Studierenden bei Unklarheiten jederzeit an die wM wenden und wurden beim Injizieren unterstützt.

Die Teilprothesen wurden unter Verwendung aller Originalgeräte und -materialien des Pala®-Injektionssystems der Kulzer GmbH gefertigt.

### **6.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE**

Ziel dieser Studie war es, einen möglichen Effekt des digitalen Feedbacksystems auf die Genauigkeit und Lernsensibilität der Studierenden zu zeigen.

In den ausgewerteten Ergebnissen zeigte sich, dass die Abweichung der Zahnaufstellung zur hergestellten Idealprothese zwischen den beiden Scans (Scan 1 drei Tage nach Beginn der Arbeit und Scan 2 nach Fertigstellung der Arbeit) bei der

Gruppe von Studierenden mit digitalem Feedback signifikant geringer ausfiel als in der gebildeten Referenzgruppe. Hier konnte keine signifikante Verbesserung bei der korrekten Zahnaufstellung der Prothese gezeigt werden.

Da beide Gruppen, abgesehen vom 3D PDF-Ausdruck des Scans, auf die gleichen Rahmenumstände zurückgegriffen haben, scheinen digitale Hilfsmittel wie in dieser Arbeit für Studierende einen definitiven Mehrwert zu haben.

Ein Grund hierfür könnten die zusätzlichen Grafiken zur Veranschaulichung der Abweichungen bzw. der korrekt aufgestellten Zähne sein, die das Verständnis für die richtige Aufstellung/Lage von Kunststoffzähnen in Zahnprothesen fördern. Zudem wurde durch die multimediale Codierung der Wissenserwerb der Studierenden in der Prothetik erleichtert.

Da es sich bei den Teilnehmern der Studie um Lernende und nicht um Experten handelte, mussten die Bilder so gestaltet werden, dass ein leichtes Verständnis selbiger erreicht werden konnte. Das sogenannte indikatorische Bildverstehen, welches die Frage aufwirft, warum die Elemente des Bildes so und nicht anders dargestellt werden, wurde hier miteinbezogen[25]. Das indikatorische Bildverstehen an sich benötigt einen größeren zeitlichen Aufwand und dementsprechend auch eine größere Anstrengung. Um dies zu erleichtern und den Lernenden zu unterstützen, gibt es die Möglichkeit sogenannte Steuerungscode miteinzubeziehen. Weidenmann beschrieb 1993 neben den sprachlichen Steuerungscode wie Kommentare im Text, Legenden und Bildbeschriftungen die bildhaften Steuerungscode [80]. Hierbei unterscheidet man zwischen expliziten und impliziten Steuerungscode. Zur expliziten Steuerung der Bildwahrnehmung zählt neben Pfeilen und Ausschnittsvergrößerung auch das farbliche Hervorheben/Kodieren, welches in unserem pdf-Ausdruck zur Anwendung kam. Auch implizite Steuerungscode fanden in unserer Studie Einzug. Dies wurde durch den Vergleich bzw. die Überlagerung zweier ähnlicher Bilder vollzogen. Nicht zu vernachlässigen ist hier aber, dass es auch passieren kann, dass die Bilder nur oberflächlich wahrgenommen werden und die pädagogische Absicht dadurch nicht zum Tragen kommt. Gründe hierfür können ein mangelndes thematisches Vorwissen des Lernenden, oder auch die fehlende Vertrautheit mit dieser Lernmethode sein [80-82], welches den Studierenden im ersten Semester noch fehlen kann und damit zu einer Beeinträchtigung des Studienergebnisses führen kann.

Außerdem gab es natürlich auch innerhalb der beiden für diese Studie gebildeten Gruppen unterschiedliche Level des zahnmedizinischen und zahntechnischen Vorwissens. So weisen Studenten mit abgeschlossener Ausbildung zum Zahntechniker oder zahnmedizinischem Hintergrund ein definitiv höheres Verständnis für die Problematiken einer korrekten Zahnaufstellung auf als Studierende ohne diese fachliche Basis.

Mayer zeigte 1989 in seiner Studie aber auch, dass Studierende mit geringerem thematischem Vorwissen mehr von Abbildungen profitieren als diejenigen mit mehr Vorwissen[83]. Wichtig sei hier der Punkt, dass sowohl die Art der Abbildung als auch der Detailreichtum und die Funktion der Abbildung an das Vorwissen der Studierenden angepasst werde. Von Kalyuga et al. wurde dies als „expertise reversal effect“ bezeichnet[64], was so viel heißt wie „Anfänger benötigen mehr Unterstützung“, während die gleichen Maßnahmen bei Lernenden mit höherem Vorwissen einen geringeren Effekt haben und sich bei Experten sogar nachteilig auswirken können[84]. Weidenmann zeigte zudem, dass „gute Bilder“ das Bildverstehen unterstützen, um zum Erreichen des Lernziels beizutragen[85]. Nach Ballstaedt sollte ein gutes Bild nicht mehr als fünf bis sieben optische Gruppen umfassen[86]. Dieser Punkt wurde in dieser Studie damit berücksichtigt, dass das eingescannte Modell soweit zurechtgeschnitten wurde, dass als optische Gruppen nur noch die Zähne und Klammern übrigblieben. Ein weiterer wichtiger Punkt für ein gutes Bild stellt nach Niegemann et. al die eindeutige Figur-Grund-Trennung dar[25]. Hierbei sollten klare Begrenzungen, Schattierungen, Einfärbungen sowie Farb- und Helligkeitskontraste beachtet werden. Auch dies wurde in unserem farblich kodierten pdf-Ausdruck berücksichtigt. Niegemann et. al beschreiben auch die didaktischen Stärken von Bildern, da diese sehr gut über räumliche Beziehungen informieren können. Besonders zeigen sie ihre Vorteile auch, wenn Konstruktionsprinzipien oder beispielsweise eine Handlungskette erlernt werden müssen, wie dies oft in der zahnmedizinischen Lehre der Fall ist[25]. Drewniak bestätigte 1992, dass Bilder dann lernförderlich sind, wenn sie komplexe Sachverhalte veranschaulichen und konkretisieren oder Informationen darstellen, die ohne Visualisierung schwer zu verstehen sind[87]. Dies trifft ebenfalls auf unsere Untersuchung anhand der Zahnaufstellung bei Herstellung einer Teilprothese in der vorklinischen Ausbildung zu. Auch hier handelt es sich um komplexe Sachverhalte, die teilweise ohne Visualisierung und allein durch das gesprochene Wort der wM nur sehr schwer für die

Studierenden/Lernenden zu verstehen sind. Einen weiteren wichtigen Punkt beim Einsatz von Bildern in der Lehre nannte Peeck. Die Qualität der Bilder sei eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz dieser[88]. Dieser Punkt könnte in zukünftigen Studien dieser Art bzw. beim zukünftigen Einsatz dieser Lehrmethode im zahnmedizinischen Bereich durch eine digitale Ansicht der Bilder verbessert werden. In unserer Studie bekamen die Studierenden die farblich kodierten Bilder als pdf ausgedruckt. Hier kann es natürlich durch z.B. Druckerschwäche (zu wenig Farbe, ungenügende Auflösung, etc.) zu Ungenauigkeiten kommen. Auch die Möglichkeit die überlagerten Bilder selbst digital zu drehen oder zu vergrößern, könnte es den Studierenden erleichtern, ihre Aufstellung besser zu korrigieren. Hier könnte man beispielsweise die Möglichkeit des Selbstscan an bereitgestellten Scan- und Computerarbeitsplätzen einführen. Denkbar wäre hier auch ein Scan mit dem Handy. Auch die Einstellung zwischen „nicht zu wenig Details“ und „nicht zu viel Details“ im Bild muss stimmen, um einen Lernerfolg hiermit zu erzielen[89, 90]. Dieser sogenannte Realitätsgrad hängt entscheidend vom Vorwissen der Lernenden und dem jeweiligen Lernziel ab. Der Realitätsgrad in dieser Untersuchung wurde mit Verwendung eines Frasaco-Lernmodells auf das Vorwissen der Studierenden im ersten Semester angepasst. Hierbei wurde beispielsweise eine optimale Verzahnung vorgegeben, wie sie aber in den meisten Fällen später in der Praxis nicht so vorzufinden sein wird. Nichtsdestotrotz ist dies wichtig, so dass sich die Studierenden zunächst langsam an diese fachspezifischen Themen herantasten können und dadurch Schritt für Schritt Konstruktionsprinzipien erlernen können. Zudem ermöglichte das Verwenden eines optimalen Zahnmodells auch die Vergleichbarkeit der einzelnen Arbeiten der Studierenden.

All die hier dargestellten Bilderhilfen hatten auch eine direkte Auswirkung auf die vergebenen Noten für die Studierenden. Bezogen auf die gegebenen Gesamtnoten der hergestellten Teilprothesen in dieser Studie konnte die Digitale Feedback Gruppe mit signifikant besseren Noten überzeugen. Durchschnittlich lagen die Noten der Referenz Gruppe zwischen 3,0-3,5, wohingegen die Noten der Digitalen Feedback Gruppe zwischen 2,5 und 3,0 lagen. Im Durchschnitt zeigte sich also eine Notenverbesserung um eine halbe Note, allein durch den Einsatz eines digitalen Feedbacks.

Die wM wussten bei der Bewertung nicht, bei welchem Studierenden die digitale Unterstützung bei seiner Arbeit zum Einsatz kam und bei welchem nicht. Dieses Ergebnis ist ein weiteres Indiz für den erfolgreichen Einsatz digitaler Hilfsmittel in der zahnmedizinischen Lehre.

### **6.4 AUSBLICK**

Gerade im Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung sollte man über mögliche Umsetzungen des Feedbacksystems nachdenken. Vor allem durch die immer geringer werdende Zeit der Studierenden in vorklinischen, technischen Kursen ist eine genaue Hilfestellung sowohl für Studierende als auch für die Ausbilder eine große Erleichterung zum Erlernen bzw. Vermitteln der technischen Grundkenntnisse. Mögliche weiterführende digitale Verbesserungen wären beispielsweise, das Einscannen der Arbeiten mit Handys zu ermöglichen. Dafür könnte eine App programmiert werden, die dann von den Studierenden auf ihr Handy geladen werden können. Zusätzlich könnte natürlich auch über so ein System, der Student Nachrichten mit seinem zuständigen wM austauschen und direkte Links zu weiterführenden Lerninhalten haben. All dies würde eine deutliche Verbesserung und Komprimierung des zu Erlernenden zur Folge haben. So könnten sich Studierende hauptsächlich auf ihre anzufertigenden Arbeiten konzentrieren ohne lange Zeitverluste bei mehrmaligem Anstehen bei den mW's in Kauf nehmen zu müssen. Auch eine beständige Aktualität durch Updates und neue Präsentationen könnte die Studierenden unterstützen.

Eine weitere sinnvolle Möglichkeit wäre die Bereitstellung eines separaten Arbeitsplatzes in der Vorklinik. An diesem Platz hätten die Studierenden die Möglichkeit ihre Arbeiten ebenfalls selbst einzuscannen. Diese Möglichkeiten der Umsetzung des Feedbacksystems würden zu einer Erleichterung in der vorklinischen Lehre sowohl für die Studierenden als auch die wM führen. Die Studierenden könnten damit ihre Arbeit mehrmals überprüfen und entsprechend anpassen, was zur Wissenserweiterung und damit einer verbesserten Lehre beiträgt.

Natürlich könnte man so einen digitalen Vergleich mit optimalen Arbeiten auch auf andere Bereiche der zahnmedizinischen Lehre übertragen. Hier wäre als Erstes die Präparation von Zähnen zu nennen. Hierbei könnten verschiedenster Fragestellung bei einer Präparation (Tangential oder Hohlkehle, Neigungswinkel des präparierten Zahnes sowie Parallelität mehrere Pfeile für Teleskop- oder Brückenarbeiten) durch

digitale Anwendungsprogramme hilfreich geklärt werden. Hey et al. führten hier als Beispiele die Möglichkeit der direkten Präparationskontrolle des Zahnarztes nach dem Präparieren an. Der Zahnarzt könnte sofort wichtige Parameter wie Unterschnitte oder eine genaue Analyse seiner Präparationsgrenze hinsichtlich Homogenität und Breite aus der Software abrufen. Dies sind wichtige Parameter für die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Zahnersatzes [91]. Ein weiterer positiver Aspekt der digitalen Unterstützung ist die Optimierung der Bewertung der studentischen Arbeiten. Durch das Einscannen und Auswerten der studentischen Arbeiten mittels digitaler Software bekommen die Studierenden ein sofortiges und ungefiltertes Feedback zu ihrer Zahnaufstellung. Dies ermöglicht ihnen eine sofortige Umsetzung anhand der Ergebnisse der digitalen Auswertung. Die Studierenden können die Ergebnisse zudem in Ruhe auf ihrem Platz nochmal durchgehen. Dies hätte, wie oben bereits beschrieben, eine Verkürzung der verlorenen Zeit beim Anstehen am Assistententisch zur Folge, so dass die Assistenten und wM sich ganz auf die komplexen Fragen konzentrieren könnten und sich dafür die nötige Zeit nehmen könnten, was aufgrund der kurzen Kursdauer und der hohen Anzahl von Studierenden in der Praxis meist nicht möglich ist. Dadurch erzielt man einen größeren Lerneffekt bei den Studierenden [92, 93]. Ein in Zukunft nicht zu vernachlässigender Punkt ist auch die Komprimierung der Kurszeit in der Vorklinik durch Einführung der neuen Approbationsordnung. Hier ist es sehr wichtig, die Lehre möglichst effektiv zu gestalten. Dies könnte durch eine digitale Unterstützung erreicht werden. Neben der objektiven Auswertung würde durch die Digitalisierung auch die Wartezeit in den Schlangen bei den wM erheblich verkürzt werden. Dadurch hätten die Studierenden effektiv mehr Zeit an ihrer Prothese zu arbeiten und würden keine wichtige Kurszeit durch Warten in einer Warteschlange vergeuden. Voraussetzung hier ist aber natürlich die optimale digitale Ausstattung der vorklinischen Räume mit Hardware und der nötigen Netzwerkinfrastruktur, so dass jeder Student schnellen Zugang zu einem Scanner hat und die Ergebnisse dann auf seinem Handy oder Tablet sofort zur Verfügung hat. Dies führt initial zu hohen Kosten und es muss auch ein betreuender Mitarbeiter da sein, der die Netzwerkinfrastruktur sowie die Hardwarekomponenten dauerhaft überwacht und gegebenenfalls wartet.

Bei aller Hilfe durch die heutigen digitalen Möglichkeiten sollte keine ausschließliche Fokussierung auf digitale Hilfsmittel erfolgen. Wichtige Aspekte, wie der hohe Erfahrungsschatz älterer wM und Zahntechniker sollten auf gar keinen Fall vernachlässigt werden. Digitale Hilfsmittel sind eine immense Hilfe, um einen Einstieg

in die zahnmedizinisch-technische Welt zu erhalten. Allerdings sind die Voraussetzungen, die hier am Anfang vorzufinden sind, ideal und nur bedingt mit der Situation in natürlichen Gebissen an echten Patienten zu vergleichen.

Die digitale Lehre bringt in diesem Bereich deshalb nicht nur Vorteile. Es gibt in der Zahnmedizin/Zahntechnik viele Dinge die man nicht pauschal auf alle Patienten anwenden kann. Das heißt, man kann das theoretische Wissen nicht immer zu hundert Prozent auf jeden Patienten anwenden und muss hier individuell den Patienten mit all seinen Parametern betrachten und dementsprechend sein Handeln anpassen. Deshalb ist hier der persönliche Kontakt zu den wM und deren Erfahrungswerten und Kompetenzen aus ihrer bisherigen Tätigkeit von hohem Wert für die Studenten [94, 95].

## 6.5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Da es sich um eine Studie handelt, die aus einer Vielzahl einzelner Schritte besteht, und es einen Einfluss der durchführenden Person sowie der Studierenden gibt, kann eine Vielzahl von Fehlerquellen auftreten.

Nichtsdestotrotz können aus der vorliegenden Studie die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden.

1. Vor dem Aushändigen des zusätzlichen digitalen Feedbacks in Form eines farblich codierten PDFs hatten sowohl die Studierenden aus der Referenzgruppe als auch die aus der Digitales-Feedback-Gruppe bei der Aufstellung der Zähne identische Abweichungen. Bis zu diesem Zeitpunkt erhielten die Studierenden denselben traditionellen Unterricht in Form einer mündlichen Bewertung durch die wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität.
2. Die Ergebnisse des zweiten Scans und somit der fertigen Teilprothese zeigten in der Digitales-Feedback-Gruppe geringere Abweichungen der von den Studierenden aufgestellten Zähne von der Referenzteilprothese als in der Kontrollgruppe. Die Studierenden aus der Digitales-Feedback-Gruppe konnten ihre Abweichungen bei der Zahnaufstellung nach der zusätzlichen Unterstützung durch das PDF verringern. Die Teilnehmer aus der Kontrollgruppe konnten ihre Abweichungen nicht verringern; der Wert des durchschnittlichen Fehlers stagnierte. Die Methode, den Studierenden ihre Abweichungen mithilfe einer Farbcodierung aufzuzeigen, war erfolgreich.
3. Bei der durch die Dozenten gegebenen Gesamtnote näherten sich die beiden Gruppen demselben Wert an, jedoch zeigte sich eine Tendenz der Digitales-Feedback-Gruppe zur besseren Note (2,5). Hier lagen 50 % der Teilnehmer zwischen der Note 2,5 und 3, wohingegen 50 % der Studierenden aus der Referenzgruppe zwischen der Note 3 und 3,5 lagen.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Mehrwert einer digitalen Unterstützung bei der Herstellung der Teilprothese in der vorklinischen Ausbildung im Vergleich zum traditionellen Unterricht an deutschen Universitäten zu ermitteln.

Hierfür wurde von einem Zahntechnikermeister eine Referenzteilprothese mit handgebogenen Klammern angefertigt, die während der Studie als Vergleichsmodell zum digitalen Überlagern diente. Alle 117 Studierenden, die an dieser Studie teilnahmen, erhielten den traditionellen Peerunterricht durch die wM der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität, während sie die Teilprothese anfertigten. Sechsfundfünfzig dieser Studierenden (Digitales-Feedback-Gruppe) erhielten eine zusätzliche Unterstützung durch ein neues digitales Auswertesystem.

Die digitale Unterstützung bestand im Scannen und Digitalisieren der hergestellten Teilprothesen und in der anschließenden Überlagerung mit den digitalen Daten der Referenzteilprothese. Danach wurde eine dreidimensionale Auswertung ausgedruckt und den Studierenden aus der Digitales-Feedback-Gruppe ausgehändigt. Der Ausdruck zeigte die farblich codierten Unterschiede zwischen den Teilprothesen der Studierenden und der Referenzteilprothese. Diese Darstellung ermöglichte eine definierte Anpassung der studentischen Arbeiten, hier der Zahnaufstellung der Teilprothesen, an das Optimum.

Die erste digitale Auswertung erfolgte drei Tage nach dem Beginn der Aufstellung, die zweite Auswertung nach der Fertigstellung der Teilprothese in Kunststoff. Zusätzlich wurden die Teilprothesen von den wM der vorklinischen Abteilung mit Noten bewertet.

Die statistische Auswertung erfolgte durch den Vergleich der Abweichungen der studentischen Arbeiten von der Referenzteilprothese. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % festgesetzt.

Insgesamt hat die Studie ergeben, dass die digitale Unterstützung der Digitales-Feedback-Gruppe zu signifikant geringeren Abweichungen von der Referenzteilprothese ( $p \leq 0,001$ ) führte als der rein traditionelle Unterricht ohne digitale Rückmeldung.

## Zusammenfassung

---

Die vorliegende Studie konnte nachweisen, dass die Unterstützung durch Computertechnologien die Zahnaufstellung der in der vorklinischen Ausbildung angefertigten Teilprothesen verbessert.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

1. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British dental journal*. 2008;204(9):505-11.
2. Schnotz W. *Pädagogische Psychologie*: Beltz, PVU Weinheim; 2006.
3. Knight GW, Guenzel P. Discrimination training and formative evaluation for remediation in basic waxing skills. *Journal of dental education*. 1990;54(3):194-8.
4. Gadbury-Amyot CC, Purk JH, Williams BJ, Van Ness CJ. Using tablet technology and instructional videos to enhance preclinical dental laboratory learning. *Journal of dental education*. 2014;78(2):250-8.
5. Schmidt RA, Wrisberg CA. *Motor learning and performance*. 2004.
6. Clark JM, Paivio A. Dual coding theory and education. *Educational psychology review*. 1991;3(3):149-210.
7. Mayer RE, Moreno R. Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*. 2003;38(1):43-52.
8. Comenius JA. *Große Didaktik*: Klett-Cotta; 1993.
9. Comenius JA. *Didáctica magna*: Ediciones Akal; 1986.
10. Aebli H. *Zwölf Grundformen des Lehrens: eine allgemeine Didaktik auf psychologischer Grundlage*: Klett-Cotta; 1983.
11. Steindorf G. *Grundbegriffe des Lehrens und Lernens*: Julius Klinkhardt; 2000.
12. Starobinski J, Neuchâtel Ud. *Jean-Jacques Rousseau: La Baconnière*; 1971.
13. Rousseau J-J. *Emil oder über die Erziehung*: Jazzybee Verlag; 2016.
14. Schmid P. Rousseau revisited. *Zeitschrift für Pädagogik*. 1992;6:839-54.
15. Böhm W. *Die Reformpädagogik: Montessori, Waldorf und andere Lehren*: CH Beck; 2012.
16. Sauer-Schiffer U. *Bildung und Beratung. Beratungskompetenz als neue Herausforderung für Weiterbildung und außerschulische Jugendbildung?*: Waxmann Verlag; 2004.
17. Raapke H-D. *Montessori heute: eine moderne Pädagogik für Familie, Kindergarten und Schule*: Rowohlt; 2011.
18. Clark D. Psychological myths in e-learning. *Medical teacher*. 2002;24(6):598-604.
19. Mayer RE. *Multimedia learning. Psychology of learning and motivation*. 41: Elsevier; 2002. p. 85-139.
20. Paivio A. Dual coding theory: Retrospect and current status. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*. 1991;45(3):255.

21. Baddeley A. Working memory. *Science*. 1992;255(5044):556-9.
22. Spitzer M. lernen. *Gehirnforschung und die Schule des lebens*. 2002.
23. Hoffmann J, Engelkamp J. *Lern-und Gedächtnispsychologie*: Springer-Verlag; 2016.
24. Mackowiak K, Lauth GW, Spieß R. *Förderung von Lernprozessen*: W. Kohlhammer Verlag; 2008.
25. Niegemann HM, Domagk S, Hessel S, Hein A, Hupfer M, Zobel A. *Kompendium multimediales Lernen*: Springer Science & Business Media; 2008.
26. Narciss S. *Informatives tutorielles Feedback. Entwicklungs-und Evaluationsprinzipien auf der Basis instruktionspsychologischer Erkenntnisse* Waxmann, Münster. 2006.
27. *Verordnung zur Neuregelung der zahnärztlichen Ausbildung*, (2020).
28. Utz K, Müller F, Bernard N, Hültenschmidt R, Kurbel R. Handbissnahme oder Stützstiftregistrierung zur Einstellung der maximalen Interkuspitation bei Totalprothesenträgern. *Zahnärztl Welt*. 1993;102:780-91.
29. Lotzmann U. *Die Prinzipien der Okklusion*1981.
30. Bumann A, Lotzmann U, Rateitschak KH. *Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien*: Thieme Stuttgart; 2000.
31. Slavicek R. *Die Okklusionskonzepte in der Totalprothetik: Neue funktionsbezogene Hilfsmittel. Schwerpunkte in der Totalprothetik Quintessenz*, Berlin. 1986.
32. Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S. *Curriculum Prothetik: Band 3: Quintessence Publishing*; 2019.
33. Caesar HH, Lehmann KM. *Die Teilprothese: Grundlagen, Konstruktion und zahntechnische Ausführung*: Verlag Neuer Merkur GmbH; 2007.
34. Hielscher AHW. *Lehrbuch der Zahntechnik Band II*. 2004;5:114-7.
35. Pospiech P. *Die prophylaktisch orientierte Versorgung mit Teilprothesen*: Georg Thieme Verlag; 2001.
36. Körber E. *Die prothetische Versorgung des Lückengebisses: Befunderhebung und Planung*: Hanser; 1987.
37. Öttl C. Das letzte Provisorium, Sofort-oder Zwischenlösung. *Der Freie Zahnarzt*. 2018;62(7-8):52-3.
38. Steffel VL. Planning removable partial dentures. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1962;12(3):524-35.
39. Gernet W. *Zahnärztliche Prothetik*: Georg Thieme Verlag; 2007.

40. Plaster U. Natürliche Asymmetrien und die patientenindividuelle Wiedergabe der Okklusionsebene ohne traditionellen Transferbogen. *Quintessenz Zahntech.* 2013;39:1266-80.
41. Cheon S-H, Park Y-H, Paik K-S, Ahn S-J, Hayashi K, Yi W-J, et al. Relationship between the curve of Spee and dentofacial morphology evaluated with a 3-dimensional reconstruction method in Korean adults. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 2008;133(5):640. e7-. e14.
42. Shannon KR, Nanda RS. Changes in the curve of Spee with treatment and at 2 years posttreatment. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics.* 2004;125(5):589-96.
43. Suckert R. *Okklusions-Konzepte*: Verlag Neuer Merkur GmbH; 1992.
44. Walter M, Eichner K. *Okklusionskonzepte. Totalprothesen* Elsevier, Urban und Fischer, München. 2005:200-16.
45. Bernhardt PDmdhO. Front-Eckzahnführung. *Zeitschrift für Kraniomandibuläre Funktion.* 2019;11(01/2019).
46. Tinschert J. *Labortechnik. Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien: Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde 1: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2007. p. 159-61.*
47. Filser F. Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich-Bewertung von Werkstoffen hinsichtlich Bruchlast und Zuverlässigkeit. *Quintessenz Zahntech.* 2002;28:48-60.
48. Kai CC, Jacob GG, Mei T. Interface between CAD and rapid prototyping systems. Part 1: a study of existing interfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 1997;13(8):566-70.
49. Altman DG. *Practical statistics for medical research*: CRC Press; 1990.
50. Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics.* 1947:50-60.
51. Sweller J, Chandler P. Evidence for cognitive load theory. *Cognition and instruction.* 1991;8(4):351-62.
52. Miller GA. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review.* 1956;63(2):81.
53. Mayer RE. From novice to expert. *Handbook of Human-Computer Interaction (Second Edition)*: Elsevier; 1997. p. 781-95.
54. Paas F, Renkl A, Sweller J. Cognitive load theory: Instructional implications of the interaction between information structures and cognitive architecture. *Instructional science.* 2004;32(1-2):1-8.

55. Anderson RC, Spiro RJ, Anderson MC. Schemata as scaffolding for the representation of information in connected discourse. *American Educational Research Journal*. 1978;15(3):433-40.
56. Anderson JR. Cognitive science series. The architecture of cognition. Hillsdale, NJ, US. Lawrence Erlbaum Associates, Inc; 1983.
57. Chi MT, Glaser R, Rees E. Expertise in problem solving. PITTSBURGH UNIV PA LEARNING RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER; 1981.
58. Larkin JH, McDermott J, Simon DP, Simon HA. Models of competence in solving physics problems. *Cognitive science*. 1980;4(4):317-45.
59. Simon HA. How big is a chunk?: By combining data from several experiments, a basic human memory unit can be identified and measured. *Science*. 1974;183(4124):482-8.
60. Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and instruction*. 1994;4(4):295-312.
61. Renkl A. Learning from worked-out examples: A study on individual differences. *Cognitive science*. 1997;21(1):1-29.
62. Atkinson RK, Derry SJ, Renkl A, Wortham D. Learning from examples: Instructional principles from the worked examples research. *Review of educational research*. 2000;70(2):181-214.
63. Tindall-Ford S, Chandler P, Sweller J. When two sensory modes are better than one. *Journal of experimental psychology: Applied*. 1997;3(4):257.
64. Kalyuga S. The expertise reversal effect. *Managing Cognitive Load in Adaptive Multimedia Learning*: IGI Global; 2009. p. 58-80.
65. Leven W. Blickverhalten von Konsumenten: Grundlagen, Messung und Anwendung in der Werbeforschung: Springer-Verlag; 2013.
66. Bücking W. Leitplanken für die orale Rehabilitation. *Zahnmedizin up2date*. 2014;8(01):7-8.
67. Arnold WH, Hoffmann T, Willershausen B. Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie: 66 Tabellen: Georg Thieme Verlag; 2010.
68. Ott R, Krug W, Vollmer H-P. Klinik-und Praxisführer Zahnmedizin: Georg Thieme Verlag; 2002.
69. Angle EH. Die Okklusionsanomalien der Zähne: H. Meusser; 1913.
70. Johnke G. Psychische Aspekte dentaler Parafunktionen: Knirschen-Mahlen-Pressen: Schlütersche; 2000.
71. Mehl A. CAD/CAM-Fertigungsverfahren-neue Ansätze und Wege. *ZWP-Zahnarzt Wirtschaft Praxis*. 2003;7:16-9.

72. Beuer F, Schweiger J, Güth J, Edelhoff D. Nach der IDS ist vor der IDS: Was kommt in der intraoralen Datenerfassung als Nächstes. Quintessenz. 2012;63:645-50.
73. Quaas S, Loos R, Sporbeck H, Luthardt R. Analyse des Einflusses der Puderapplikation auf die Genauigkeit optischer Digitalisierung. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift. 2005;60(2):96-9.
74. F. Beuer JS. KaVo Everest-System. Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien. 1: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2007.
75. Luthardt R, Quaas S, Rudolph H. Maschinelle Herstellung von Zahnersatz. Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag. 2007:65-94.
76. Rudolph H, Quaas S, Luthardt R. Matching point clouds: limits and possibilities. International journal of computerized dentistry. 2002;5(2-3):155-64.
77. Bensel T, et al. Werkstoffmechanische Beeinflussung von Prothesenkunststoffen durch Single-Shot-Desinfektion. J Dent Oral Med. 2016;p. Poster 982.
78. Naumann K. Experimentelle Vergleichsstudie zum Ausmaß dreidimensionaler Positionsänderungen von Kunststoffzähnen bei der Herstellung totaler Prothesen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verfahrenstechnologien. Diss Universität Jena. 2009.
79. Peters A, Arnold C, Setz JM, Boeckler AF. Factors in polymerization influencing the accuracy of PMMA denture bases. Issues. 2018;2017:2016.
80. Weidenmann B. Informierende Bilder: Inst. für Erziehungswiss. und Pädag. Psychologie; 1993.
81. Weidenmann B. Lernen mit Bildmedien [Learning with pictorial media]. Weinheim: Beltz Verlag; 1994.
82. Krapp A, Weidenmann B. Pädagogische psychologie: Beltz Weinheim; 2001.
83. Mayer RE. Models for understanding. Review of educational research. 1989;59(1):43-64.
84. Fletcher J, Tobias S. The multimedia principle. The Cambridge handbook of multimedia learning. 2005;117:133.
85. Weidenmann B. Wissenserwerb mit Bildern: Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen: H. Huber; 1994.
86. Ballstaedt S-P. Wissensvermittlung: Die Gestaltung von Lernmaterial: Beltz, PsychologieVerlagsUnion; 1997.

87. Drewniak U. Lernen mit Bildern in Texten: Untersuchung zur Optimierung des Lernerfolgs bei Benutzung computerpräsentierter Texte und Bilder: Waxmann; 1992.
88. Peeck J. The role of illustrations in processing and remembering illustrated text. *The psychology of illustration*. 1987;1:115-51.
89. Rieber LP. *Computers graphics and learning*: Brown & Benchmark Pub; 1994.
90. Dwyer F. Effect of students entering behavior on visualized instruction. *Journal of experimental Education*. 1975;43:78-83.
91. J. Hey Dr. med. dent PKDI, M. Urbanek cand. med. dent, F. Beuer Univ.-Prof. Dr. med. dent. MME. Objective Analysis of Preparations in Dental Training: Development of Analytical Software. . *International Journal of computerized dentistry* 2013;16:317-25.
92. McElvany N, Schroeder S, Hachfeld A, Baumert J, Richter T, Schnotz W, et al. Diagnostische Fähigkeiten von Lehrkräften: bei der Einschätzung von Schülerleistungen und Aufgabenschwierigkeiten bei Lernmedien mit instruktionalen Bildern. *Zeitschrift für pädagogische Psychologie*. 2009;23(34):223-35.
93. Niegemann HM. *Neue Lernmedien*. Huber: Bern. 2001.
94. Engelage S. Die Bedeutung von Lebens-und Berufserfahrung für den Lehrerberuf. Quereinsteigende und Regelstudierende im Vergleich. *Lehrerbildung auf dem Prüfstand*. 2013;6(1):50-69.
95. Meier R. Der praxisbegleitete Studiengang zur Lehrperson an der Sekundarstufe I an der PH Zürich. *Erfahrungsbericht*. *Journal für LehrerInnenbildung*. 2010;3:36-45.

## 9. ANHANG

### 9.1 MESSWERTE

<b>Gruppe</b>	<b>Student</b>	<b>Durchschnittliche Abweichung</b>
DFG	1	4.478.687.297
DFG	2	3.103.507.686
DFG	4	4.219.673.290
DFG	5	2.336.766.709
DFG	6	3.594.746.036
DFG	9	4.340.260.605
DFG	10	1.531.242.037
DFG	11	2.044.234.386
DFG	12	1.818.006.562
DFG	13	2.188.599.567
DFG	15	1.840.500.569
DFG	16	3.183.430.058
DFG	17	4.798.973.639
DFG	18	3.475.540.995
DFG	19	1.122.961.625
DFG	20	1.370.363.351
DFG	21	1.558.138.417
DFG	22	4.652.523.798
DFG	23	4.818.328.707
DFG	25	2.067.775.375
DFG	28	3.896.920.477
DFG	29	1.487.982.288

## Anhang

<b>DFG</b>	30	1.499.531.956
<b>DFG</b>	31	1.293.849.239
<b>DFG</b>	32	4.190.553.971
<b>DFG</b>	33	3.719.949.380
<b>DFG</b>	34	1.673.130.536
<b>DFG</b>	36	3.839.025.384
<b>DFG</b>	38	1.567.214.764
<b>DFG</b>	39	2.195.248.229
<b>DFG</b>	40	4.660.004.973
<b>DFG</b>	41	4.338.108.590
<b>DFG</b>	42	1.347.125.860
<b>DFG</b>	43	4.037.209.706
<b>DFG</b>	46	4.073.644.505
<b>DFG</b>	47	1.411.471.003
<b>DFG</b>	48	1.912.670.377
<b>DFG</b>	49	2.135.729.330
<b>DFG</b>	50	4.300.939.911
<b>DFG</b>	51	2.887.207.502
<b>DFG</b>	53	2.002.239.119
<b>DFG</b>	54	2.111.639.542
<b>DFG</b>	55	4.542.124.830
<b>DFG</b>	57	1.853.827.014
<b>DFG</b>	58	5.008.118.837
<b>DFG</b>	60	4.802.115.136
<b>DFG</b>	61	3.176.674.183
<b>DFG</b>	62	4.606.939.685

## Anhang

<b>DFG</b>	63	4.601.867.123
<b>DFG</b>	64	1.041.193.606
<b>DFG</b>	65	2.300.938.171
<b>DFG</b>	66	1.639.114.522
<b>RG</b>	1	2.561.736.393
<b>RG</b>	2	2.518.819.507
<b>RG</b>	3	1.849.995.918
<b>RG</b>	4	2.014.504.443
<b>RG</b>	5	2.405.945.758
<b>RG</b>	6	4.456.169.203
<b>RG</b>	8	3.954.371.737
<b>RG</b>	9	2.106.644.831
<b>RG</b>	10	4.522.183.212
<b>RG</b>	11	2.180.346.061
<b>RG</b>	12	2.326.621.173
<b>RG</b>	13	4.361.207.122
<b>RG</b>	14	3.051.871.117
<b>RG</b>	15	2.785.753.191
<b>RG</b>	17	1.761.263.265
<b>RG</b>	18	2.866.431.149
<b>RG</b>	19	2.502.019.787
<b>RG</b>	20	2.669.689.609
<b>RG</b>	21	2.439.420.810
<b>RG</b>	23	2.271.819.233
<b>RG</b>	24	2.404.796.780

## Anhang

<b>RG</b>	25	2.947.214.009
<b>RG</b>	26	4.274.616.983
<b>RG</b>	28	
<b>RG</b>	29	2.364.814.354
<b>RG</b>	30	3.808.889.457
<b>RG</b>	31	1.814.112.441
<b>RG</b>	32	1.533.008.320
<b>RG</b>	33	3.911.802.602
<b>RG</b>	34	1.760.910.214
<b>RG</b>	35	2.144.682.104
<b>RG</b>	37	2.285.007.942
<b>RG</b>	38	1.840.720.271
<b>RG</b>	39	2.208.090.380
<b>RG</b>	40	2.118.604.224
<b>RG</b>	41	4.436.634.763
<b>RG</b>	42	4.090.712.212
<b>RG</b>	44	3.660.265.842
<b>RG</b>	45	4.294.559.031
<b>RG</b>	46	4.218.814.725
<b>RG</b>	47	2.547.333.304
<b>RG</b>	49	4.672.232.188
<b>RG</b>	50	2.812.395.628
<b>RG</b>	51	1.680.353.040
<b>RG</b>	52	1.824.747.749
<b>RG</b>	53	2.699.408.427
<b>RG</b>	54	2.324.198.109

## Anhang

---

<b>RG</b>	55	2.808.762.740
<b>RG</b>	57	2.488.388.967
<b>RG</b>	58	1.580.931.515
<b>RG</b>	59	3.343.313.134
<b>RG</b>	60	2.124.397.036
<b>RG</b>	61	4.640.379.381
<b>RG</b>	62	4.542.739.998
<b>RG</b>	63	4.110.226.010
<b>RG</b>	64	2.882.208.762
<b>RG</b>	65	3.447.218.364
<b>RG</b>	66	1.753.165.022
<b>RG</b>	67	4.107.758.719
<b>RG</b>	68	2.491.238.350
<b>RG</b>	69	2.090.442.122
<b>RG</b>	70	4.119.887.986
<b>RG</b>	71	2.168.547.789

Tab. 1: Wert der durchschnittlichen Abweichung beider Gruppen

## Anhang

---

<b>Gruppe</b>	<b>Platznummer</b>	<b>Note</b>	<b>Durchschnittliche Abweichung</b>
<b>DFG</b>	1	3	3.873.319.144
<b>DFG</b>	2	2,5	4.093.560.717
<b>DFG</b>	3	2	3.837.694.301
<b>DFG</b>	6	3	4.093.568.241
<b>DFG</b>	9	2,5	4.074.212.328
<b>DFG</b>	10	2,5	3.952.044.654
<b>DFG</b>	11	4,5	3.980.403.529
<b>DFG</b>	12	3,5	3.998.429.825
<b>DFG</b>	13	3	4.114.637.353
<b>DFG</b>	15	3	3.945.822.138
<b>DFG</b>	17	3	3.891.809.629
<b>DFG</b>	18	4,5	3.621.893.444
<b>DFG</b>	19	3	3.984.802.857
<b>DFG</b>	20	3	4.136.007.039
<b>DFG</b>	21	2,5	3.886.465.449
<b>DFG</b>	22	3	3.938.121.462
<b>DFG</b>	23	3	4.053.166.916
<b>DFG</b>	24	3,5	4.138.002.046

## Anhang

<b>DFG</b>	25	2,5	4.302.960.787
<b>DFG</b>	26	1	3.945.315.530
<b>DFG</b>	27	2,5	3.907.765.498
<b>DFG</b>	28	2	3.967.236.855
<b>DFG</b>	29	2	4.041.652.891
<b>DFG</b>	30	3	4.157.528.219
<b>DFG</b>	31	2,5	4.061.404.066
<b>DFG</b>	32	3	3.796.076.736
<b>DFG</b>	33	2	4.053.389.697
<b>DFG</b>	34	3	4.020.526.077
<b>DFG</b>	35	2,5	3.866.291.019
<b>DFG</b>	36	3	4.019.186.489
<b>DFG</b>	37	3	4.301.811.023
<b>DFG</b>	38	3	3.985.534.951
<b>DFG</b>	39	5,5	3.817.177.081
<b>DFG</b>	40	2,5	3.725.498.044
<b>DFG</b>	41	3	3.987.612.285
<b>DFG</b>	42	2	3.799.419.020
<b>DFG</b>	43	2	4.203.415.369
<b>DFG</b>	45	3,5	4.010.195.355
<b>DFG</b>	46	3	3.985.641.345
<b>DFG</b>	47	3	4.063.240.047

## Anhang

<b>DFG</b>	48	3	3.991.194.144
<b>DFG</b>	49	3,5	3.819.131.127
<b>DFG</b>	50	2,5	4.330.323.410
<b>DFG</b>	51	3,5	4.375.338.037
<b>DFG</b>	52	2	4.316.239.845
<b>DFG</b>	53	3	4.267.091.473
<b>DFG</b>	54	2,5	4.118.203.766
<b>DFG</b>	55	3	4.198.530.893
<b>DFG</b>	56	2,5	4.311.824.983
<b>DFG</b>	57	3	4.160.569.825
<b>DFG</b>	58	2,5	3.867.545.038
<b>DFG</b>	60	3	3.924.032.278
<b>DFG</b>	61	3	4.258.348.666
<b>DFG</b>	62	2,5	3.854.373.667
<b>DFG</b>	63	3	4.090.811.589
<b>DFG</b>	64	3	3.960.748.895
<b>DFG</b>	65	3	4.257.413.183
<b>DFG</b>	66	2,5	4.115.188.566

## Anhang

<b>RG</b>	1	4	3.486.009.533
<b>RG</b>	2	3	3.980.219.397
<b>RG</b>	3	4	3.980.556.472
<b>RG</b>	4	3,5	4.294.242.355
<b>RG</b>	5	2	4.649.030.099
<b>RG</b>	6	3	4.183.283.166
<b>RG</b>	7	2,5	4.329.114.064
<b>RG</b>	8	3,5	4.822.433.801
<b>RG</b>	9	3	4.069.838.111
<b>RG</b>	10	3,5	4.024.252.753
<b>RG</b>	11	3	4.235.560.928
<b>RG</b>	12	3	3.977.867.568
<b>RG</b>	14	3	4.213.390.548
<b>RG</b>	15	2	4.274.591.467
<b>RG</b>	16	2,5	4.603.424.911
<b>RG</b>	17	3	3.991.065.087
<b>RG</b>	18	2,5	4.678.469.209
<b>RG</b>	19	3	4.376.605.521
<b>RG</b>	20	2,5	4.550.305.267
<b>RG</b>	21	2,5	4.138.547.212
<b>RG</b>	22	3	4.671.596.381
<b>RG</b>	23	3	4.514.526.050

## Anhang

<b>RG</b>	24	3	4.528.057.450
<b>RG</b>	25	2,5	4.375.254.494
<b>RG</b>	26	3	4.378.407.623
<b>RG</b>	27	3	4.687.326.229
<b>RG</b>	28	3	4.192.970.548
<b>RG</b>	29	3	4.468.585.390
<b>RG</b>	30	3,5	4.267.417.218
<b>RG</b>	31	3,5	4.366.771.828
<b>RG</b>	32	3	4.370.958.949
<b>RG</b>	33	3	4.354.530.046
<b>RG</b>	34	4	4.356.293.971
<b>RG</b>	35	3	4.216.332.999
<b>RG</b>	36	3,5	4.075.959.508
<b>RG</b>	37	2,5	4.337.458.461
<b>RG</b>	38	3	4.192.784.758
<b>RG</b>	39	3,5	4.378.144.618
<b>RG</b>	40	2,5	4.240.123.237
<b>RG</b>	41	3	4.277.217.250
<b>RG</b>	42	3,5	4.189.464.480
<b>RG</b>	43	4	4.056.308.327
<b>RG</b>	44	4,5	4.074.589.404
<b>RG</b>	45	4	4.395.443.550

## Anhang

<b>RG</b>	46	3,5	4.606.352.902
<b>RG</b>	47	3	4.510.588.744
<b>RG</b>	48	1,5	4.567.140.984
<b>RG</b>	49	3	4.242.821.805
<b>RG</b>	51	3	3.948.383.148
<b>RG</b>	52	3	4.367.243.478
<b>RG</b>	53	3,5	4.159.408.596
<b>RG</b>	54	3,5	4.147.468.785
<b>RG</b>	55	3,5	4.290.583.220
<b>RG</b>	56	3	3.788.002.936
<b>RG</b>	57	3,5	4.183.575.678
<b>RG</b>	59	4,5	4.271.707.163
<b>RG</b>	60	3	4.103.247.743
<b>RG</b>	61	3,5	4.214.828.179
<b>RG</b>	62	2,5	4.269.674.732
<b>RG</b>	63	2,5	4.401.480.869
<b>RG</b>	64	3,5	4.307.032.025
<b>RG</b>	65	4	4.426.031.498
<b>RG</b>	66	3,5	3.830.266.974
<b>RG</b>	67	2	4.149.459.519
<b>RG</b>	68	2,5	3.933.405.406
<b>RG</b>	69	3	4.407.594.549

## Anhang

---

<b>RG</b>	70	3	4.288.763.786
<b>RG</b>	71	3,5	3.996.085.510

Tab. 2: Auswertung nach der Gesamtnote

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik  Technisch-Propädeutischer-Kurs

**4. TEILPROTHESE**

**4.1. MODELLHERSTELLUNG (CAVE: MODEL NICHT WECHSELN!)**

4.1.1. zwei OK-Modelle mit Split-Cast (Platznummer & Unterschrift!) \_\_\_\_\_

4.1.2. zwei UK-Gegenkiefermodelle: \_\_\_\_\_

4.1.3. drei zusätzliche OK-Modelle (*Superhartgips*): \_\_\_\_\_

**4.2. KLAMMERBIEGEN ALS HAUSAUFGABE (!!!)**

4.2.1. Prothetischer Äquator und Klammerverlauf eingezeichnet: \_\_\_\_\_

4.2.2. Fertige Klammern an 15, 24 und 27: \_\_\_\_\_

4.2.3. Polierte Klammern am Meistermodell im Artikulator: \_\_\_\_\_

4.2.4. Schnellklammertestatmodell mit prothetischem Äquator, Klammerverlauf und Platznummer eingezeichnet: \_\_\_\_\_

**Abgabe Schnelltestat Klammerbiegen:** \_\_\_\_\_

**4.3. KIEFERRELATIONSBESTIMMUNG, EINARTIKULIERUNG**

4.3.1. OK Kunststoffschablone: \_\_\_\_\_

4.3.2. OK Kunststoffschablone mit Wachswällen: \_\_\_\_\_

4.3.3. horizontale Kieferrelationsbestimmung im Phantomkopf (*Aluwachs*): \_\_\_\_\_

4.3.4. OK-Modell einartikuliert mittels Einartikulierungshilfe (*Splitcast-Probe!*): \_\_\_\_\_

4.3.5. UK-Modell einartikuliert (*Splitcast-Probe und Kontrolle, Shimstock-Protokoll!*): \_\_\_\_\_

4.3.6. Zweites OK-Modell gegen den Unterkiefer einartikuliert: \_\_\_\_\_

**Shimstock-Protokoll:** *Shimstockfolie soll mindestens an 14/15/24/27 ziehen!*  
*(„+“ soll von Student eingetragen und auf dem Modell vermerkt werden!)*

17	16	15	14	13	12	11	21	22	23	24	25	26	27
E	E										E	E	

**4.4. ZAHNAUFSTELLUNG**

4.4.1. Aufstellung der zu ersetzenden Seitenzähne: \_\_\_\_\_

4.4.2. Kontrolle der Okklusion (Statik! Es dürfen keine dynam. Kontakte vorhanden sein): \_\_\_\_\_

4.4.3. Ausmodellation in Wachs: \_\_\_\_\_

4.4.4. OK-Modell mit Silikon ausgeblockt: \_\_\_\_\_

4.4.5. Teilprothese eingebettet (mit Wachskanälen): \_\_\_\_\_

4.4.6. Teilprothese ausgebrüht; Zähne angeraut: \_\_\_\_\_ **Marken-Nr.:** \_\_\_\_\_

Name: \_\_\_\_\_ Platznummer: \_\_\_\_\_ 4

Abb. 23: Testatheft Technisch-Propädeutischer-Kurs Seite 4

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik  Technisch-Propädeutischer-Kurs

4.4.7. Teilprothese injiziert und ausgebettet: \_\_\_\_\_

4.4.8. Teilprothese reokkludiert/Frühkontakte eingeschliffen: \_\_\_\_\_

4.4.9. Teilprothese ausgearbeitet: \_\_\_\_\_

4.4.10. Teilprothese poliert: \_\_\_\_\_

4.4.11. Teilprothese auf dem zweiten Modell aufgepasst: \_\_\_\_\_

4.4.12. Okklusion eingeschliffen (Statik! Es dürfen keine dynam. Kontakte vorhanden sein): \_\_\_\_\_

**ABGABE DER TEILPROTHESE:** \_\_\_\_\_

Abb. 24: Testatheft Technisch-Propädeutischer-Kurs Seite 5

## 9.2 MATERIALLISTE

Die folgenden Ausführungen geben Auskunft über die verwendeten Werkstoffe und die zur Verfügung gestandenen Gerätschaften.

Werkstoff	Produktname	Hersteller	Typbezeichnung	Eigenschaften
<b>Gips</b>	HS-Superhartgips Natur	Henry-Schein, Melville, New York, USA	Modellhartgips, Typ IV	<p>Superharter Naturgips der Klasse IV, Thixotrop, Hervorragende Kantenstabilität, hohe Kratz- und Bruchfestigkeit</p> <p>Verarbeitungszeit: 7min</p> <p>Abbindezeit: ca. 12–14min</p> <p>Druckfestigkeit nach 1 Stunde: &gt; 55 MPa</p> <p>Druckfestigkeit nach 24 Stunden: &gt; 80 MPa</p> <p>Abbindeexpansion nach 2 Stunden: max. 0,09 %</p> <p>Mischungsverhältnis: 100 g : 200 ml</p>
	HS-Hartgips blau	Henry-Schein	Modellhartgips Typ III	<p>Synthetischer Hartgips zur Fertigung von Meister- und Arbeitsmodellen</p> <p>Verarbeitungszeit: 6 min</p>

## Anhang

				Abbindezeit: 10 min
				Druckfestigkeit nach 24 Stunden: 30 MPa
				Lineare Abbindeexpansion nach 2 Stunden: < 0,02 %
				Mischungsverhältnis Wasser : Gips: 30 ml : 100 g
<b>Silikon</b>	Heraform®	Kulzer Mitsui Chemicals Group GmbH, Deutschland	RS, Typ A + B	Additionsvernetztes Dubliersilikon, hohe Zeichnungsgenauigkeit, hohe Reißfestigkeit, granulierbar, Mischungsverhältnis 1:1, Shorehärte 26
<b>Klammern</b>	Klammerkreuz	Henry Schein Dental GmbH, Langen (Hessen)	V2A-Stahl (Chrom-Nickel Stahl)	Durchmesser: 0,9 mm Legierungsbestandteile: 17–18m % Chrom, 72–74m % Eisen, 7–10m % Nickel Edelstahl, sehr widerstandsfähig gegen Korrosion und Säuren
<b>Wachs</b>	Platte n-wachs	Modellierwachs rosa® Orbis Dental Handelsgesellschaft mbH, Münster, Deutschland	Modellierwachs rosa DIN – ISO 2207 VDG XI 8100	Form: fest Farbe: rosa bis pink Geruch: schwach typisch Tropfpunkt je nach Typ: 54–61 °C Löslichkeit in Wasser: unlöslich

## Anhang

				Flammpunkt [°C]: > 210 °C/DIN 51376
	Alu- wachs	Aluwax Denture	Aluwax Dental Products Company, Allendale, USA	Bisswachsplatt en mit Aluminiumstau b. Format 143 x 73 mm.
	Klebe- wachs	Supradent- Klebewachs	Chemisches Dental- Labor Oppermann -Schwedler, Bonn, Deutschland	Universalwach s
<b>Lichthärtenden Kunststoffplatt en</b>	Individo® Lux	VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland	Löffelmaterial lichthärtend	Form: Pastös Farbe: rosa Geruch: Charakteristisch Pfefferminz
<b>Artikulationsgi ps</b>	HS- Artikulationsgips Natur	Henry Schein Dental Deutschland GmbH, Langen (Hessen)	Artikulationsgip s Typ-III- Hartgips	Mischverhältnis: 40 ml/ 100 g geringe Expansion hervorragendes Stehvermögen Abbindezeit: 4–5 min, Bearbeitungszeit: 3 min Abbindeexpansion: 0,04 %, Druckfestigkeit nach 1 Stunde: 20 MPa
<b>Kunststoffzäh ne</b>	Pala Mondial	Kulzer GmbH,	Kunststoffzäh ne/	Copolymer:

## Anhang

<b>Isoliermittel</b>	<p>Hanau, Deutschland</p>	<p>Verblendschal en</p> <p>Typ 31</p>	<p>Poly(methacrylate)</p> <p>NanoPearls</p> <p>gewährleisten höchste Abrasionsstabilität sowie hohe Bruchsicherheit</p> <p>Natürliche und lebhaft Oberflächenstrukturen entsprechen der Zahngrundform und wirken dadurch harmonisch</p> <p>Verbreiterte Zahnbasis und vergrößertes Zahnvolumen unterstützen die Papillengestaltung und es entstehen keine dunklen Nischen und vertikalen Kanten</p>
	<p>Aislar®</p>	<p>Kulzer GmbH, Deutschland</p>	<p>Isolierung für Kunststoffproth etik</p>

## Anhang

				Für Heißpolymerisate	Kalt- und
<b>Haftvermittler</b>	Palabond®	Kulzer Mitsui Chemicals Group GmbH, Deutschland	Haftvermittler	Zusammensetzung:	
				Methylmethacrylat, Dimethacrylat, Methacrylsäure	
				Indikation:	
				zwischen Prothesenkunststoff und Kunststoffzähnen	
				zwischen Prothesenkunststoff und Reparaturen	
<b>Prothesenkunststoff</b>	PalaXPress®	Kulzer Mitsui Chemicals Group GmbH, Deutschland	Universal- Prothesenkunststoff	Zusammensetzung:	
				Pulverhauptkomponente: Methylmethacrylat- Copolymer	
				Flüssigkeitshauptkomponente: Methylmethacrylat, Dimethacrylat.	
				Mischverhältniss:	
				30 g Pulver : 15 ml Flüssigkeit (2:1)	
				Polymerisationzeit:	
				40 min bei 55 °C und 2 bar Druck im Palamat®	

## Anhang

<b>Politurpaste</b>	Universal Polierpaste	Ivoclar- Vivadent	Universal Polierpaste Tube 100 ml	Hochglanzpolitur Kunststoff- Metallarbeiten	von und
	<b>Isoliermittel</b>	HS-Silikonspray	Henry- Schein	Silikonspray	Verhindert das Anhaften von Gips, beim Einsprühen von Muffelformen aus Kunststoff entsteht ein wirksamer Schutz vor aggressiven Einbettmassen

Tab. 3: Übersicht über die benutzten Werkstoffe

## 9.3 GERÄTELISTE

Gerät	Produktname	Hersteller	Typbezeichnung	Beschreibung
<b>Frasaco®-Zähne und -Modell</b>	Frasaco®-Modell	Frasaco GmbH, Tettnang	ANA-4 Teilbezahnter Modellkiefer	Studien- und Übungsmodell für praktische Übungen im vorklinischen Studentenlabor
<b>Artikulator</b>	SAM®	SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting	SAM 2 PX	Arcon Bauweise, Zentrikverriegelung für uneingeschränkte Öffnungsrotation, Bennett- und Kondylarbahn-Neigung einstellbar, Curvaturen austauschbar, stufenlose Protrusionseinstellung, 30° Retrusionseinstellung, modular ausbaubares Gerät zur Volljustierung
	ARTEX®	Amann Girschbach GmbH, Dürrenweg	Artex® CPR	Arcon-Bauweise, sagittale Kondylenbahnneigung: -20° bis +60°

## Anhang

		40, Deutschland		Benett Winkel: -5° bis +30°  Protrusion: 0 bis 6mm  Retrusion: 0 bis 2mm
<b>Ausbrühgerät</b>	Ausbrühgerät Handbrause	mit KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß	KaVo Ausbrühgerät	EWL
<b>Bunsenbrenner</b>	Laborbrenner	Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland	Bunsenbrenner Bijou 90	Laborbrenner für Erdgas und Propan
<b>Druckluft Injektionsgerät</b>	Injektionsgerät	Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland	Palajet®	Druckanschluss: max. 10 bar  Nenndruck: 4 bar  Kolbengeschwindigkeit: 0-50 mm/s  Presskraft auf den Füllzylinder: ca. 2kN  Indikation: Heiß-/ Kaltpolymerisate
<b>Drucktopf</b>	Druckpolymerisation sgerät	Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland	Palamat elite®	Drucktopf zur Verarbeitung von Heiß- und Kaltpolymerisaten
<b>Gipsanmischgerät</b>	Vakuum- Anmischgerät	Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland	Renfert Twister	

## Anhang

<b>Gipsanrührbecher</b>	Anmischbecher inkl. Rührwerk	Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland	Vakuumanrührbecher	Fassungsvermögen: 500ml Becher aus hochfestem Polycarbonat
<b>Küvette</b>	Einzelküvette Palajet	für Kulzer GmbH, Deutschland	Palajet® Singleflask	Einfaches Handling Kurze Gießkanäle
<b>Labor-Handstück</b>	Handstück	KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß	K5 plus Handstück 4911	Drehzahl: 1000–35 000 U/min Patentiertes Einwellensystem Leistung: max. 85 W Drehmoment: max. 4,5 N/cm
<b>Lichthärtegerät für Kunststoffplatten</b>	Lichthärteofen	Heraeus Kulzer GmbH, Deutschland	Dentacolor XS	
<b>Fräsen</b>	Fräsen Handstück	für Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland		
<b>Poliermaschine</b>	Poliereinheit	KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß	EWL 5820	Drehzahl: 1500/3000 U/min bei 50 Hz Saugleistung: Ca. 480m³/h

## Anhang

<b>Rüttler</b>					Anschlusswert: 400 W	
	Rüttler	Wassermann Dental- Maschinen GmbH, Hamburg, Deutschland	Power KV-56	Rüttler	Ausgelegt für Dauerbetrieb	
<b>Scanner</b>	Scan-Einheit	KaVo Dental GmbH, Biberach an der Riß	KaVo scan	Everest®	Leichter über öffnende Frontklappe mit Einhand- Bedienung, CCD-Kamera, Streifenlichtprojek- tor, Messfeldgröße 40x60mm, herausnehmbarer Objektträger	Zugang vertikal
	Gipsmodell Trimmer	Wassermann Dental- Maschinen GmbH, Hambur, Deutschland	HSS-88		Max. 3000 U/min Magnetventil zur automatischen Wasserzuführung	

Tab. 4: Übersicht über die genutzten Geräte

## 9.4 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Die Frontal-, Sagittal- und Horizontalebene des Schädels [29].....	8
Abb. 2: Die Latero- und Mediotrusionsseite [29].....	8
Abb. 3: Klassifikation des Lückengebisses nach Kennedy [33].....	9
Abb. 4: Klassifikation des Lückengebisses nach Eichner [33].....	10
Abb. 5: Abstützungsformen von Teilprothesen nach Gernet et. Al. [39] .....	12
Abb. 6: Kieferkammmitte Oberkiefer .....	13
Abb. 7: Kieferkammmitte Unterkiefer.....	13
Abb. 8: Okklusionsebene .....	14
Abb. 9: Spee-Kurve (sagittale Kompensationskurve) .....	15
Abb. 10: Wilson-Kurve.....	15
Abb. 11: Modell und Teilprothese, mit Arti-Spray® mattiert.....	27
Abb. 12: Modell, auf Objektträger fixiert .....	28
Abb. 13: Startfenster Software Everest Scan Control® (Version 8.2.1.11).....	28
Abb. 14: Scanvorgang der Software Everest Scan Control® (Version 8.2.1.11) .....	29
Abb. 15: Einfügen der Referenzteilprothese in der Software Geomagic Qualify 2012®.....	30
Abb. 16: Einfügen der Referenzteilprothese in der Software Geomagic Qualify 2012®.....	31
Abb. 17: Gipsmodell mit Referenzpunkten und fertig überlagerte Prothese.....	32
Abb. 18: Einzelne Fertigungsschritte der Teilprothese im technisch- propädeutischen Kurs an der Ludwig-Maximilians-Universität .....	35
Abb. 19: Einzelne Fertigungsschritte der Teilprothese im technisch- propädeutischen Kurs an der Ludwig-Maximilians-Universität .....	38

Abb. 20: Ablauf der Studie.....	39
Abb. 21: Medianwerte des durchschnittlichen Fehlers (Average Deviation).....	43
Abb. 22: Median der Gesamtnoten von Digitales-Feedback-Gruppe und Referenzgruppe.....	44
Abb. 23: Testatheft Technisch-Propädeutischer-Kurs Seite 4.....	83
Abb. 24: Testatheft Technisch-Propädeutischer-Kurs Seite 5.....	84

Abbildungen 1-4 mit freundlicher Genehmigung von Verlag Neuer Merkur GmbH.

## **9.5 TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 1: Wert der durchschnittlichen Abweichung beider Gruppen.....	75
Tab. 2: Auswertung nach der Gesamtnote.....	82
Tab. 3: Übersicht über die benutzten Werkstoffe .....	90
Tab. 4: Übersicht über die genutzten Geräte.....	94

## **9.6 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

Wissenschaftliche Mitarbeiter - wM

## **10. DANKSAGUNGEN**

Herrn Professor Dr. Florian Beuer MME und Herrn Dr. Ephraim Nold M.Sc. möchte ich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit sehr herzlich danken, sowie für die gute prothetische Ausbildung in meiner Studienzeit in München.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Ing. Kurt-Jürgen Erdelt für die Unterstützung während der gesamten Arbeit bedanken.

Dem ganzen zahntechnischen Labor der Prothetik, insbesondere John Meinen möchte ich für die Hilfe bei der Herstellung der Referenzteilprothese herzlich danken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Ehemann Dr. Karlheinz Proske M.Sc. für das unermüdliche Motivieren.

## 11. EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

**Proske, Nathalie**

---

Name, Vorname

Ich, Nathalie Proske, geboren am 24.01.1986 in Passau, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema

„Verbesserung der vorklinischen Ausbildung durch computerunterstützte Auswertung der Zahnaufstellung in Teilprothesen“

ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Osterhofen, 15.07.2022

---

Ort, Datum

Nathalie Proske

---

Unterschrift Doktorandin